UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES

-- Aspectos Geotécnicos --

HUMBERTO JORGE PALMA GUERREIRO

(Licenciado)

Dissertação para a Obtenção do Grau de
Mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia

ORIENTADOR

Carlos A. J. V. Dinis da Gama (Professor Catedrático, IST, UTL)

JÚRI

Carlos A. J. V. Dinis da Gama (Professor Catedrático, IST, UTL)
José A. Simões Cortez (Professor Catedrático, FE, UP)
Rui T. da Silva Couto (Professor Associado, IST, UTL)
Maria Matilde M. O. C. H. Costa e Silva (Professora Auxiliar, IST, UTL)

Julho de 2000

à memória do meu Pai ...

"Os que se enamoram da prática sem cuidar da ciência são como navegadores que entram no navio sem leme, nem bússola e que nunca têm a certeza para onde estão indo."

LEONARDO DA VINCI (SÉC. XV e XVI)

AGRADECIMENTOS

Um trabalho deste tipo nunca poderia ser realizado sem a colaboração de diversas pessoas e entidades, às quais não queria deixar de agradecer pela importância que assumiram no desenvolvimento do mesmo.

Começaria por agradecer com um carinho especial à Maria todo o incentivo, compreensão e auxílio que me prestou na elaboração deste trabalho, sem os quais não teria sido possível a sua concretização.

Gostaria também de agradecer a toda a minha família, e em especial à minha mãe, pelo apoio constante que me proporcionaram durante a realização desta tese.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Dinis da Gama, agradeço os constantes ensinamentos que me vem dando deste o tempo da licenciatura, a confiança que depositou neste trabalho e as sugestões que proferiu contribuindo para um direccionamento adequado do estudo e para o seu enriquecimento.

Aos meus colegas e amigos, Mário Bastos e Pedro Bernardo, ao meu amigo Pedro Silva Lopes e ao meu sogro, José Brás Sobreiro, agradeço a amizade com que acompanharam o trabalho, e a disponibilidade que mostraram na sua leitura, avançando com sugestões importantes para a sua melhoria.

À Sofia agradeço a preciosa ajuda que me deu relativamente aos aspectos ligados com a abordagem geológica do Anticlinal de Estremoz e a constante amizade demonstrada. A todos os restantes colegas do CEVALOR agradeço a compreensão e constantes incitamentos que me deram, com especial destaque para o José Oliveira, o Nuno Bonito e a Sandra Lopes.

Ao CEVALOR agradeço com muita sinceridade a abertura que mostraram relativamente ao meu interesse em concluir o mestrado, e a possibilidade que me deram de continuar ligado a este Centro, com uma palavra de destaque para a Eng.ª Sónia Pereira, que me apoiou na realização deste estudo, facultando o acesso a informações e a meios indispensáveis à sua elaboração.

Às empresas Plácido José Simões, Rosa Portugal e Solubema, deixo aqui uma palavra de apreço por me terem possibilitado o acesso às suas pedreiras para recolha de informação, sem as quais seria extremamente difícil o desenvolvimento deste estudo.

Ao Eng.º Parreirão Gomes agradeço a sua amável disponibilidade para a troca de ideias e o acesso a informação importante que me proporcionou sobre algumas explorações subterrâneas actualmente em curso, que em muito contribuíram para que este trabalho possa ter aplicação prática.

Gostaria também de agradecer ao Prof. Fornaro e ao Eng.º Claudio Oggeri do Politécnico de Torino as informações e documentação preciosa que facultaram, bem como o apoio logístico

durante as visitas realizadas a explorações subterrâneas de rocha ornamental em Itália, nomeadamente de ardósias (Liguria) e de mármores (Carrara).

Ao Prof. Simões Cortez e à Empresa das Lousas de Valongo, agradeço a simpatia com que permitiram e conduziram a visita efectuada às unidades extractivas subterrâneas de lousas em Valongo, e aos importantes ensinamentos facultados durante a mesma.

À FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, ao abrigo do Programa PRAXIS XXI, agradeço a bolsa de mestrado que me foi concedida, sem a qual a realização deste evento não teria sido possível.

Todos aqueles que de algum modo contribuíram para este estudo e que não foram referidos, para eles deixo aqui também uma palavra de apreço e estima de igual intensidade.

EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES

-- Aspectos Geotécnicos --

RESUMO

O recurso a métodos de exploração subterrânea de mármores no Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa é actualmente uma realidade. Neste trabalho enquadra-se e analisa-se a necessidade de utilização da lavra subterrânea naquela região e as potenciais vantagens da mesma, apresentando, para termo de comparação, outros núcleos mundiais onde este tipo de desmonte é praticado desde há longa data.

A exploração subterrânea apresenta, quando abordada de um modo empírico, alguns perigos, manifestados em situações de instabilidade dos desmontes, situações de insegurança e redução da blocometria disponível para exploração, sobretudo no Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa em virtude da sua complexidade geológica. O presente trabalho tem como principal objectivo o estudo de uma metodologia de actuação para a abertura de uma exploração subterrânea de mármores no Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa, que fuja aos padrões empíricos até aqui utilizados nas explorações a céu aberto, dando um maior destaque às questões geotécnicas e de engenharia envolvidas.

A metodologia proposta engloba três fases de actuação. Na primeira será caracterizado o jazigo marmóreo sob o ponto de vista ornamental e geotécnico, à qual se segue uma fase de dimensionamento dos desmontes e de planeamento dos avanços, estudando os meios e operações necessárias à produção em subterrâneo dos mármores e, por fim, uma terceira fase onde se analisam as necessidades de aplicação de elementos de suporte artificial e as actividades de monitorização das cavidades, com vista ao controlo da sua estabilidade.

UNDERGROUND MARBLE EXPLOITATION

-- Geotechnical Aspects --

ABSTRACT

Nowadays the use of underground quarrying methods for the exploitation of marbles, in the Anticline of Estremoz-Borba-Vila Viçosa, is a reality. The need to introduce underground quarrying in that region is framed and analyzed in this work, as well as its potential advantages presenting, for comparison terms, other nucleus worldwide where this type of quarrying method has been taking place for a long while.

Underground exploitation presents, when approached empirically, some hazards, manifested in situations of stability and safety problems, and reduced block yield available for exploitation, especially in the Anticline of Estremoz-Borba-Vila Viçosa, due to its geological complexity. The prime objective of this work is the study of a design methodology for the opening of an underground exploitation of marbles in the Anticline of Estremoz-Borba-Vila Viçosa, which deviates from the empiricism used until now in open pit operations, exercising greater emphasis on the geotechnical and engineering questions involved.

The proposed methodology includes three operational phases. Firstly, the marble deposit will be characterized under an ornamental and geotechnical point of view, this is followed by the dimensioning of the quarry and the planning of the advance *operations*, studying the means and the operations required to the underground production of marbles, and, finally, the requirements for artificial support and for monitoring activities of the cavities for stability control are analyzed.

PALAVRAS CHAVE

Mármores

Desmontes

Subterrâneo

Prospecção

Geotecnia

Geomecânica

Projecto

Produção

Câmaras e Pilares

Estabilidade

Monitorização

KEY WORDS

Marbles

Exploitation

Underground

Exploration

Geotechnics

Geomechanics

Design

Production

Rooms and Pillars

Stability

Monitoring

SIMBOLOGIA

A lista que se apresenta em seguida visa definir a simbologia utilizada ao longo do trabalho de modo a facilitar a leitura e a compreensão do texto.

SIMBOLOGIA	SIGNIFICADO	SIMBOLOGIA	SIGNIFICADO
c	coesão	V_p	velocidade de propagação das ondas P (longitudinais)
c_d	coesão das descontinuidades	V_s	velocidade de propagação das ondas S (transversais)
e_a	espaçamento aparente entre fracturas	V_{s1} , V_{s2}	vãos de segurança das câmaras
e_v	espaçamento verdadeiro entre fracturas	W_0	largura da câmara
E_d	módulo de elasticidade dinâmico	W_p	largura do pilar
E_m	módulo de elasticidade do maciço	δ	deslocamento
f	frequência de fracturação	ε	deformação unitária
F_s	factor de segurança	ϕ	ângulo de atrito
h	profundidade	ϕ_d	ângulo de atrito das descontinuidades
H_0	altura da câmara	γ	peso específico
H_p	altura do pilar	ν	coeficiente de Poisson
Is	índice do ensaio de carga pontual	ν_d	coeficiente de Poisson dinâmico
I_b	dimensão média do bloco unitário	σ_1	tensão principal máxima
I_v	índice volumétrico	σ_3	tensão principal mínima
JCS	resistência à compressão das paredes das descontinuidades	σ_c	resistência à compressão
JRC	coeficiente de rugosidade das descontinuidades	σ_h , σ_x , σ_y	tensões horizontais
m, s	parâmetros do critério de rotura de Hoek - Brown	σ_n	tensão normal
Q	*"Rock Tunnelling Quality Index"* da classificação de Barton; tensão horizontal	σ_r	tensão radial
RMR	*"Rock Mass Rating"* da classificação de Bieniawski	σ_t	resistência à tracção
RQD	*"Rock Quality Designation"*	σ_v , σ_z , P	tensões verticais
V	vão da câmara	σ_θ	tensão tangencial
V_B	volume médio dos blocos expectáveis	τ	tensão de corte

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

Resenha Histórica

Exploração de Mármores

Caracterização do Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa

Geomecânica Aplicada à Exploração Subterrânea de Mármores

Engenharia da Produção em Subterrâneo

Monitorização e Controlo da Estabilidade

ÍNDICE DE QUADROS

Exploração de Mármores

Caracterização do Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa

Geomecânica Aplicada à Exploração Subterrânea de Mármores

Engenharia da Produção em Subterrâneo

Monitorização e Controlo da Estabilidade

1. INTRODUÇÃO

1.1. PREÂMBULO

A exploração de rochas ornamentais começou por ser uma arte no tempo dos egípcios e, mais tarde, no tempo dos romanos. Nessa altura, o desmonte de rochas para fins ornamentais não poupava o esforço do homem e dos animais para que fossem erguidas as edificações monumentais que caracterizaram aquelas épocas. A pedra assumia então, um protagonismo importante ao nível da construção, pelo que todos os sacrifícios eram permitidos em prol desta actividade.

Com o decorrer dos tempos começou a ser atribuído maior valor à vida humana, tendo para isso contribuído as imposições económicas que, a partir de determinada altura, começaram a imperar na indústria extractiva, em geral, e na exploração de rochas ornamentais, em particular, que conduziram, naturalmente, ao avanço científico e tecnológico. O desenvolvimento da ciência e da tecnologia permitiu a criação de melhores condições de trabalho aos operários das pedreiras, como aliás se terá passado em muitos outros ramos da actividade industrial.

De destacar também as preocupações ecológicas que começaram a ganhar voz no final século XX, e que têm, e continuarão a ter, uma posição de relevo contra a visão meramente tecnocrata e economicista da exploração de recursos naturais. De facto, assumem cada vez maior importância a defesa do ambiente, a preservação da natureza e da paisagem, o bem estar e a qualidade de vida das pessoas. Neste contexto, a exploração de rochas ornamentais, necessária à construção, deverá progressiva mas rapidamente adaptar-se a estas novas exigências.

O cumprimento destas e de outras normas, tais como a segurança e higiene no trabalho e a satisfação do mercado, permitirá a qualquer empresa uma concorrência leal e um lugar estável no exigente mercado dos nossos tempos.

A legislação ambiental, cada vez mais exigente, a competitividade dos mercados e o aparecimento de novas tecnologias, têm contribuído para uma mudança de mentalidade e para o aparecimento de um novo marco na evolução da actividade extractiva. É neste contexto que aparece a exploração subterrânea de mármores em Portugal.

A exploração subterrânea de mármores já vem sendo praticada noutros países há bastante tempo, nomeadamente na Itália e nos Estados Unidos da América, tendo sido adoptada, em muitos casos, devido às características geológicas da massa mineral. No nosso país, até há pouco tempo, este tipo de exploração de rochas ornamentais era apenas praticado nas lousas, em Valongo, próximo do Porto, embora utilizando um método de desmonte muito específico, função das características da jazida.

Devido a um conjunto de factores económicos e às características geológicas e geotécnicas de determinadas zonas do maciço marmóreo do Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa, também conhecido como Anticlinal de Estremoz, a exploração de mármores em subterrâneo é presentemente uma realidade, nesta região.

A aplicação deste método ao Anticlinal de Estremoz apresenta algumas particularidades que motivam um estudo mais aprofundado, nomeadamente o dimensionamento dos desmontes e a manutenção da sua estabilidade. Dadas as características específicas do Anticlinal em termos da geologia, com a presença de dobramentos frequentes e de zonas de fracturação intensa, revestem-se de extrema importância os estudos preliminares que permitirão elaborar o projecto de engenharia. Para isso, devem ser utilizados os conhecimentos adquiridos noutros locais onde tal método já é utilizado, embora com os devidos ajustes motivados pelas características específicas do Anticlinal.

A base científica a incorporar nesses estudos prova a evolução que se tem verificado no recurso à ciência na exploração de rochas ornamentais, nomeadamente a utilização cada vez mais frequente da geologia, para a definição da estrutura da massa mineral e da geomecânica para o dimensionamento dos desmontes. A aplicação destas duas ciências apresenta-se tanto mais vincado, quanto mais complexas forem as características da jazida. Assim, e como se irá expor ao longo deste trabalho, a utilização da geologia e da geomecânica torna-se imprescindível para a abertura de explorações subterrâneas de mármores.

O modo como cada uma das duas ciências acima citadas, deve ser aplicada, e em que fases do projecto de exploração, constituem o principal contributo deste trabalho para o desenvolvimento da exploração subterrânea de mármores em Portugal.

1.2. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foca os aspectos geotécnicos mais relevantes inerentes à metodologia que é proposta para o estudo de abertura de uma exploração subterrânea de mármores, atendendo às características específicas da região alvo do trabalho, ou seja, o Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa.

Para além dos aspectos geotécnicos e da metodologia de estudo proposta, e no sentido de compreender a evolução registada no sector das rochas ornamentais ao longo dos anos, é apresentada uma breve resenha histórica, bem como os principais núcleos mundiais onde se exploram mármores para fins ornamentais.

O recurso mármore, enquanto rocha ornamental, é apresentado em termos das suas principais características, assim como os vários tipos de explorações em função da sua forma e localização. As operações que incorporam o ciclo de produção do desmonte de mármore em pedreiras a céu aberto é descrito e apresentado de um modo simples e sintético.

Os principais núcleos de exploração subterrânea de mármores são também referidos, com especial destaque para a maior pedreira subterrânea mundial, localizada nos Estados Unidos da América, mais propriamente no estado de Vermont, e para as explorações subterrâneas de Carrara, em Itália. Para estes dois núcleos, serão apresentadas as suas principais características, nomeadamente geológicas, de geometria dos desmontes e produtivas, entre outras.

Com o objectivo de enquadrar a necessidade de avançar com a exploração subterrânea no Anticlinal, são apresentadas algumas considerações em termos das condições geológicas de aplicabilidade, das vantagens e desvantagens em relação ao método de desmonte a céu aberto e alguns aspectos económicos e de licenciamento das explorações. São ainda descritos os vários métodos mineiros subterrâneos passíveis de serem aplicados na exploração de mármores.

É ainda realizada uma descrição das principais características geológicas e geotécnicas do Anticlinal que podem interessar para a abertura de uma exploração subterrânea, sendo apresentados os principais núcleos de exploração de mármores existentes nesta estrutura.

Enquadrado no principal objectivo deste trabalho, nomeadamente no referente aos aspectos geotécnicos envolvidos na metodologia de estudo proposta, são apresentadas as várias fases que englobam a caracterização geológica e geomecânica da jazida, sendo descritos e explicados os vários métodos de caracterização utilizados, quer do ponto de vista teórico, quer prático. No que diz respeito à caracterização geológica, são apresentados os vários tipos de estudo, desde os levantamentos de campo, passando pelos métodos de prospecção geofísica e acabando na análise de testemunhos de sondagens mecânicas. Para o estudo geomecânico do maciço são apresentados os ensaios que podem ser realizados, quer laboratoriais, quer *in situ*, e os resultados a obter com cada um deles.

Para a definição do modelo geomecânico são apresentados vários aspectos teóricos assentes na Teoria Matemática da Elasticidade, nomeadamente o comportamento dos maciços sujeitos à abertura de cavidades. São ainda aflorados alguns aspectos relacionados com a deformabilidade e resistência dos maciços rochosos, bem como a contribuição das descontinuidades que compartimentam o maciço para estas duas propriedades.

Como métodos de estudo do maciço rochoso são apresentadas as classificações geomecânicas actualmente mais utilizadas, nomeadamente, a classificação de Bieniawski e a classificação de Barton, e ainda os vários métodos de análise numérica presentemente disponíveis em programas computacionais (Método das Diferenças Finitas, Método dos Elementos Finitos, Método dos Elementos Discretos, entre outros).

Com base na caracterização geológica e geomecânica do maciço marmóreo, é proposta uma metodologia de zonamento do maciço, atendendo a factores ornamentais e geotécnicos, com vista a orientar o dimensionamento dos desmontes e o seu avanço futuro.

Para dimensionar os desmontes são apresentados métodos analíticos (Método da Área Tributária) e métodos de análise numérica que podem ser utilizados em conjunto para optimizar os parâmetros geométricos das cavidades.

No sentido de definir o método de desmonte mais adequado a cada caso, com base nas características geológicas, geomecânicas e ornamentais do maciço, devem conhecer-se bem as várias operações que compõem o ciclo produtivo, bem como as operações auxiliares necessárias ao desmonte. Para isso, apresentam-se, com algum detalhe, as operações referidas, não esquecendo as normas de segurança e higiene no trabalho que devem ser cumpridas e a necessidade de realizar trabalhos de prospecção durante o avanço dos desmontes, com vista a optimizar a lavra da jazida.

Englobados nos aspectos geotécnicos envolvidos na abertura de uma exploração subterrânea de mármores são apresentadas as actividades, os equipamentos e os tipos de medições necessárias à monitorização dos desmontes, bem como os métodos de sustimento artificiais que podem ser utilizados para controlar a estabilidade do maciço.

Para finalizar o estudo, apresentam-se as tendências futuras da exploração subterrânea de mármores, a diversos níveis, desde o avanço tecnológico aos constrangimentos ambientais, passando pelos riscos inerentes a uma abordagem empírica, e concluindo sobre o importante papel que a engenharia e a geomecânica apresentam em termos de progresso do sector.

2. RESENHA HISTÓRICA

2.1. EXPLORAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO MUNDO

A exploração de rochas ornamentais data já da antiguidade. Iniciada pelos Egípcios e continuada pelos Gregos, foi mais tarde retomada pelos Romanos a partir do ano 200 A.C.

Foi na região de Carrara (mármores Apuan) onde o mármore começou a ser explorado intensamente pelos Romanos a partir do ano 89 A. C.. A zona onde esta exploração se realizava era conhecida, na época, por Luna. O mármore Lunense começou a ser usado nas habitações privadas no ano 48 A.C (Capuzzi *et al.*, s/d).

A exploração deste recurso nem sempre foi contínua através dos tempos, devido, por um lado, às grandes desavenças entre os Romanos relativamente à exploração das pedreiras de mármore de Apuan e, por outro, aos ataques dos povos bárbaros e ao seu domínio nesta zona, que motivavam a paragem da exploração.

Durante o Renascimento (séc. XV e XVI) e mesmo no Neoclassicismo (séc. XVIII e XIX), Michelangelo, Giambologna e Canova, entre outros, utilizaram o mármore de Apuan para erguer monumentos e estátuas de rara beleza, ainda hoje apreciadas. O mármore ficou conhecido em todo o mundo através dos italianos e sempre ligado à zona de Carrara ("Montanha de Mármore"). Todo o mármore de outros países, era importado para Itália e vendido como mármore de Carrara ou de Apuan.

O desenvolvimento da actividade de extracção de mármore só ganha expressão no século XIX graças ao emprego de pólvora negra no desmonte. Esta nova técnica veio aumentar os níveis de produção, embora tenha também contribuído para a deterioração de determinadas jazidas, graças à fracturação induzida pela acção do explosivo no maciço. Do material desmontado com recurso àquela técnica, só uma pequena parte pode ser aproveitada comercialmente pelo facto da estrutura cristalina do mármore não suportar as ondas da explosão. Na Figura 2.1 ilustra-se esta situação com algum humor. Com a situação existente havia que pensar numa nova solução de desmonte que minimizasse a perda de material e que aumentasse a produtividade.

De encontro a esta ideia, foi desenvolvido em 1854 o fio helicoidal, pelo francês Eugène Chevalier, na forma curiosa de uma máquina para serrar a pedra. Como é normal nas novas tecnologias, os aperfeiçoamentos surgem naturalmente por parte de outros cientistas, tendo aparecido na exposição internacional de Paris (1855) uma máquina de fio helicoidal que entusiasmou os industriais do mármore.

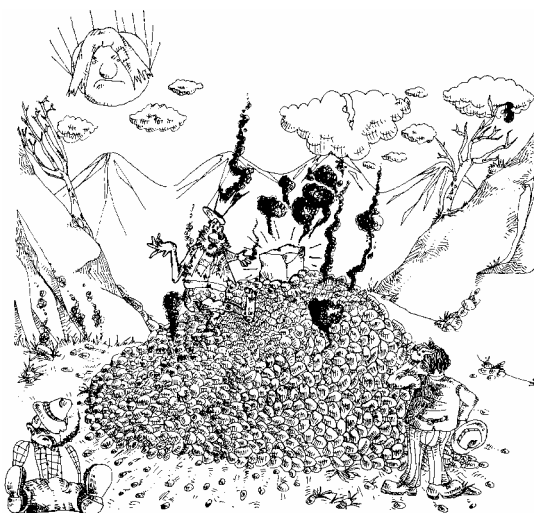



Figura 2.1 – Resultado da utilização da pólvora no desmonte de mármores.
(adaptado de Capuzzi *et al*, s/d)

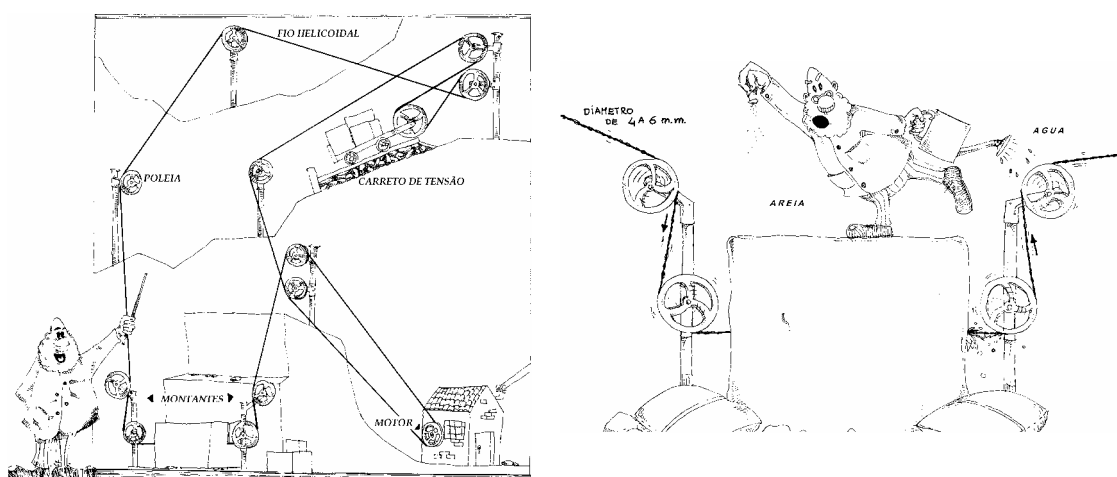
Apesar disso, a grande difusão do fio helicoidal na extracção do mármore só foi definitivamente aceite em 1897, quando o engenheiro italiano A. Monticolo introduziu a poleia penetrante que permitia talhar o mármore. Esta técnica promovia o corte da rocha graças à tensão que nela é exercida pelo fio helicoidal em movimento linear e à mistura de água e areia siliciosa (abrasivo) que é adicionada no sulco, conduzindo à desagregação da rocha na espessura correspondente ao diâmetro do fio, tal como se pode observar na Figura 2.2.

A. Esquema de funcionamento do fio helicoidal B. Aditivos a aplicar para promover o corte da rocha

Figura 2.2 – Aspectos do funcionamento do fio helicoidal.
(adaptado de Capuzzi *et al*, s/d)

Com o fio helicoidal era também possível realizar cortes horizontais dependendo das necessidades de desmonte. Nos casos em que só existiam duas faces livres, e não se podia criar outra através do aparecimento de uma superfície de fractura, utilizava-se a técnica do fio helicoidal para definir a terceira face livre.

O fio helicoidal começou a perder o prestígio que detinha com o aparecimento, em 1978, da máquina de fio diamantado que, com os melhoramentos sucessivos, se tornou num equipamento de corte de mármore em todas as direcções (cortes verticais, horizontais e inclinados) com excelentes rendimentos (Capuzzi *et al.*, s/d). A ferramenta cortante que equipa a máquina de fio diamantado é composta por um cabo de aço onde são distribuídas pérolas diamantadas devidamente espaçadas por espaçadores metálicos e molas. Esta tecnologia pode ser utilizada para fazer os cortes nas bancadas ou para esquartejar os blocos.

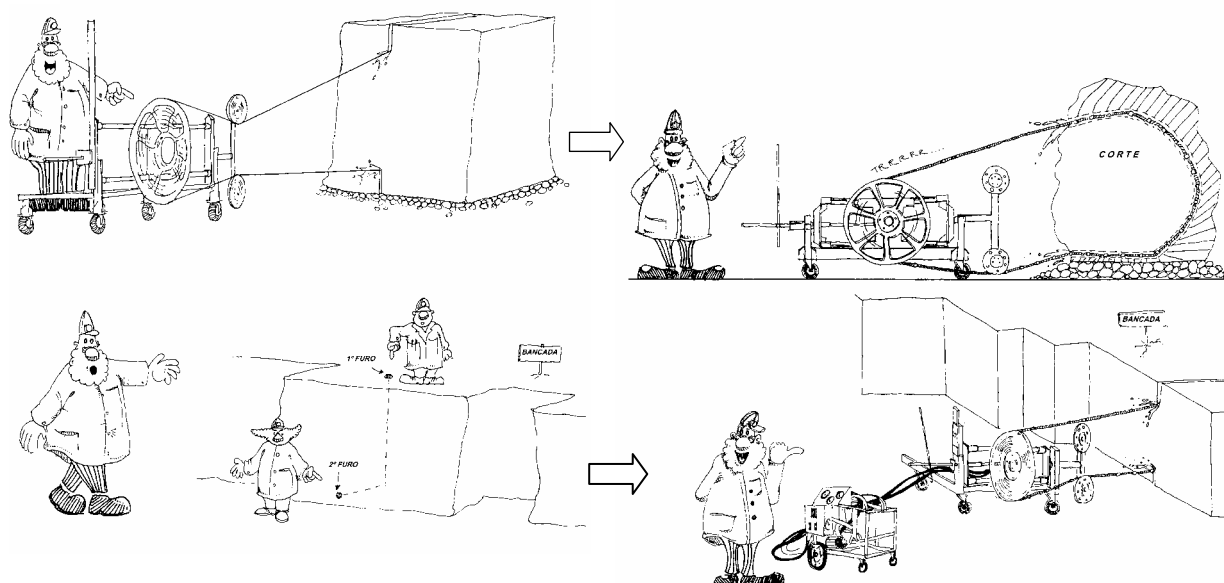



Figura 2.3 – Aspectos do funcionamento da máquina de fio diamantado.
(adaptado de Capuzzi *et al*, s/d)

Hoje em dia, a máquina de fio diamantado ainda se encontra bastante difundida na indústria extractiva das rochas ornamentais e, em especial, na dos mármores. Apesar disso, tem vindo a ser notória a substituição desta técnica em algumas operações devido ao aparecimento da roçadora. Esta permite, graças a sucessivos desenvolvimentos, realizar cortes horizontais e verticais, podendo ser utilizada, no desmonte quer a céu aberto, quer em subterrâneo, assumindo, neste último, um papel de destaque relativamente à máquina de fio diamantado. As características e modo de funcionamento desta última serão abordadas ao longo deste trabalho.

2.2. EXPLORAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM PORTUGAL

Em Portugal, a exploração de mármores data do tempo dos Romanos. A comprovar este facto, destacam-se os vestígios existentes da actividade extractiva desse povo, na zona de Vila Viçosa. As bases e os capitéis das colunas do Templo de Diana em Évora, constituem uma prova da exploração de mármores no séc. II da era Cristã. A utilização dos mármores Portugueses teve uma evolução natural ao longo dos tempos, comprovada pelas inúmeras obras e monumentos espalhados pelo Alentejo, desde o tempo dos Romanos até períodos mais recentes da monarquia Portuguesa (Palácio de Vila Viçosa).

A utilização do mármore de Estremoz vem já da antiguidade, estando a nome da vila directamente ligado a este recurso. Segundo Crespo (*in* Costa, 1992) o nome da vila de Estremoz resulta de dois toponímicos: "estr" = "str" que significa brilhante e "mós" que significa pedras.

No estrangeiro também aparecem indícios da importância e aproveitamento económico dos mármores nacionais, citando-se a título de exemplo as exportações das rochas portuguesas para França, durante o reinado de Luís XIV (séc. XVII), para edificar as suas faustosas construções.

Apesar da evolução registada, só no século XIX, a partir da Exposição Internacional de Paris (em 1855) se iniciou a nova era da indústria extractiva e transformadora das rochas ornamentais em Portugal (Castro e Sola, 1969, *in* Andrade e Apolinário, 1978).

As pedreiras mais exploradas, nessa altura, eram as de Pêro Pinheiro (Sintra), que continuaram a sê-lo até meados deste século. A partir de então começou a incrementar-se a extracção dos calcários cristalinos Alentejanos (mármores), até aí incipiente.

No período entre 1950-1970 registou-se uma grande dependência do mercado interno, pelo que os ciclos da actividade de construção civil se repercutiam de imediato, na actividade do sector. A exportação, embora já com valores significativos, era constituída principalmente, por blocos.

A partir de meados da década de 1970, a abertura ao exterior da nossa economia teve uma influência decisiva no evoluir da estrutura da indústria de extracção e transformação das pedras naturais assistindo-se, a partir dessa data, a fortes taxas de investimento, e ao lançamento decisivo de empresas Portuguesas na conquista dos mercados externos.

Em termos cronológicos, foi na década de 1950 que se assistiu à introdução do compressor de perfuração automática, e na década de 1960, à instalação da primeira grua ("*Derrick*") nas pedreiras de St. António, em Estremoz. Na década de 1970 assiste-se ao início da electrificação das pedreiras do Alentejo, apesar da primeira máquina de fio diamantado só ser instalada no Anticlinal em 1989, mais propriamente numa pedreira de Borba (Martins, 1990).

Em termos espaciais, o desenvolvimento e consolidação da indústria das rochas ornamentais em Portugal deu-se, numa primeira fase, segundo dois vectores locacionais: Pêro Pinheiro, como primeiro pólo da actividade extractiva, para depois se especializar, essencialmente, na actividade de transformação da pedra e o Anticlinal Estremoz-Borba-Vila Viçosa como ainda hoje, o grande centro da actividade extractiva de mármores.

Actualmente, a actividade desta indústria está bastante mais dispersa pelas diferentes regiões do país, embora as localizações históricas continuem a ter uma relevância indiscutível no campo da produção. Um princípio determinante para a maior disseminação da actividade é a importância crescente que tem vindo a assumir a extracção e transformação, quer de mármores e de granitos, quer de outras variedades de calcários, com especial destaque para a zona do Maciço Calcário Estremenho, a qual tem crescido de importância ao nível dos calcários sedimentares.

Como se pode observar na Figura 2.4, as jazidas de **mármores** localizam-se maioritariamente no Alentejo, nos distritos de Évora e Beja, assumindo especial importância os calcários cristalinos do Anticlinal Estremoz-Borba-VilaViçosa. É de salientar que os mármores desta jazida assumem tonalidades englobando o branco, o creme, o rosa e o cinzento.

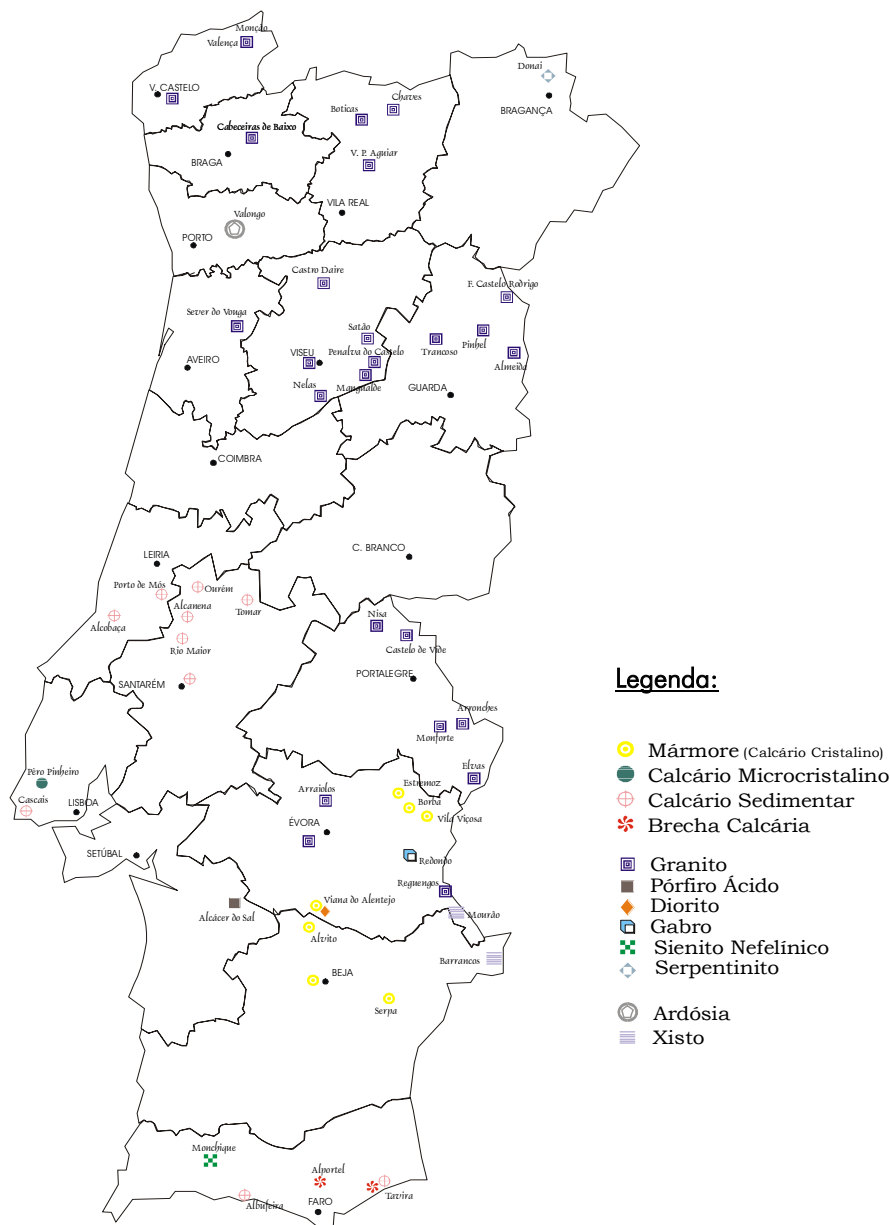



Figura 2.4 – Localização das principais jazidas de rochas ornamentais em Portugal.
(adaptado de Martins, 1996a)

Relativamente aos **calcários sedimentares**, os quais têm, ultimamente, vindo a assumir uma grande procura, quer a nível do mercado interno, quer mesmo ao nível da exportação, têm os seus pólos de extracção localizados na zona do Maciço Calcário Estremenho, nos distritos de Santarém, Alcobaça e Leiria.

Os **granitos** também abundam no Alentejo, especialmente no distrito de Portalegre, e na região Norte de Portugal, de onde se destacam os distritos de Braga, Viana do Castelo, Vila Real e Viseu.

As **lousas ou ardósias** têm em Valongo, no distrito do Porto, o seu principal núcleo produtivo, enquanto o **xisto** é explorado, essencialmente, no Alentejo, mais propriamente nas localidades de Barrancos e Mourão.

2.3. EXPLORAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM SUBTERRÂNEO

A exploração de rochas ornamentais em subterrâneo começou na antiguidade com os Egípcios, onde, segundo dados existentes, as galerias atingiam cerca de 6 m de altura (Fornaro e Bosticco, 1994a). Na antiga Grécia o mármore estatuário da Ilha de Paros foi também explorado em subterrâneo. Posteriormente, na época Romana, muitas outras pedreiras italianas subterrâneas ganharam fama.

Trabalhar em subterrâneo significava não ter que enfrentar os rigores do clima e a possibilidade de realizar selectivamente as operações de desmonte de rocha.

Segundo Fornaro e Bosticco (1994a), a técnica de corte para desmonte de rochas conhecida como "Corte Romano" foi utilizada até à introdução dos explosivos no séc. XIX. Este método necessitava de um estudo exaustivo das fracturas, que constituíam planos de corte favoráveis, atendendo ao método de desmonte utilizado. Os cortes a favor (segundo a linha da maior declive da camada de mármore), denominados "*cesurae*", eram efectuados com camartelos e cunhas ao longo das diaclases até à profundidade necessária, de modo a individualizar os blocos através de cortes em forma de V. Depois de individualizados, os blocos eram removidos com o auxílio de alavancas de ferro e cunhas de madeira. O aspecto dos cortes realizados nas explorações do tempo dos Romanos pode ser observado nas fotografias apresentadas na Figura 2.5.

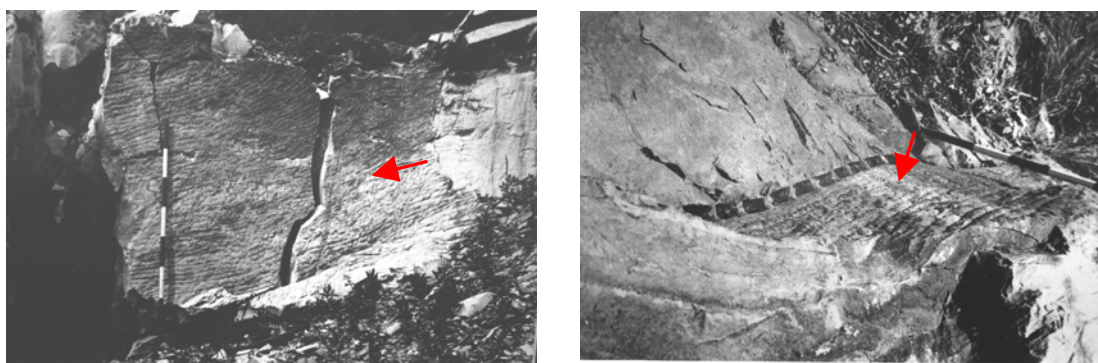



Figura 2.5 – Aspecto dos cortes realizados pelos Romanos.
(fonte: Museu do Mármore em Carrara – Itália)

As ferramentas utilizadas na época eram, essencialmente, cunhas, cinzéis, camartelos, marretas, pás, picaretas e enxadas. As cunhas e os camartelos eram utilizados para abrir as fracturas

naturais, enquanto as marretas e os cinzéis eram usados para efectuar cortes ou ranhuras que conduziam à divisão das massas desmontadas em blocos de dimensões comerciais.

Existiam ainda outras técnicas utilizadas, tais como o enchimento de ranhuras previamente realizadas na rocha, com água, cujo congelamento, e consequente aumento de volume, promovia a fracturação e individualização do bloco. Em alguns casos, eram utilizadas cunhas de madeira embebidas em água que provocavam a abertura de fracturas quando inchavam ou gelavam (Fornaro e Bosticco, 1994a).

Na região de Portodoro (Itália), na antiguidade, o mármore era desmontado com recurso à força humana. As operações de desmonte consistiam, inicialmente, na criação de um túnel para entrada na jazida, através do uso do escopro e da marreta (ver Figura 2.6). Depois de aberto o túnel era definida a largura dos blocos através da execução de dois rasgos laterais. Para individualizar o bloco eram utilizadas serras de ferro temperado nos cortes de levante e verticais posteriores, cuja acção de corte era auxiliada pela introdução de água e de areia siliciosa. A remoção do bloco fazia-se com recurso a cunhas de madeira ou de ferro (Del Soldato e Pintus, 1985).

Legenda:

← Túnel de acesso ao jazigo;

↑ Rasgos laterais que definem o bloco a desmontar;

→ Operação de abertura dos túneis com marreta e escopro;

↓ Corte de rocha com uma serra de ferro temperado, sendo adicionada no corte água e sílica;

° Homem que fornece água e sílica para os cortes;

± Cunhas de ferro e marreta utilizadas para destacar o bloco;

″ Aspecto das paredes desmontadas;

≥ Operação de expedição do bloco para o exterior da pedreira através de um plano inclinado.

Figura 2.6 – Método de desmonte em subterrâneo utilizado na antiguidade na zona de Portodoro – Itália.
(adaptado de Fornaro e Bosticco, 1994a)

Com a evolução tecnológica registada ao longo dos tempos, os trabalhos de desmonte de rocha ornamental em subterrâneo também evoluíram. Hoje em dia, este método de desmonte recorre, essencialmente, ao uso da roçadora e da máquina de fio diamantado, para individualização dos blocos.

3. EXPLORAÇÃO DE MÁRMORES

3.1. JAZIDAS DE MÁRMORE NO MUNDO

Um jazigo mineral marmóreo pode ser analisado do ponto de vista do seu interesse económico como rocha ornamental, com base nos seguintes parâmetros (Bradley, 1999):

Rocha:	Cor, textura e tamanho do grão.
Jazida:	Orientação e inclinação das camadas; Grau e características da fracturação; Volume e distribuição espacial do material com qualidade ornamental.
Características superficiais:	Grau de alteração do material à superfície; Presença de vegetação e solo à superfície, e suas características.
Características locais:	Condições logísticas da jazida; Localização geográfica do maciço marmóreo.
Mercado:	Características do mercado marmóreo.

Os principais núcleos de extracção de mármore que satisfazem os parâmetros anteriormente enumerados, e que por isso se encontram em exploração, foram originados por metamorfismo regional (caracterizado por alta pressão e baixa ou média temperatura). Os melhores exemplos deste tipo de depósito são o Anticlinal de Estremoz – Borba – Vila Viçosa em Portugal, onde se extrai o "Rosa Portugal" (mármore rosa) e os Alpes Apuan em Itália (Carrara) nos quais se explora o "Bianco Carrara" (mármore branco).

Os depósitos de mármore estendem-se, geralmente, em áreas de vários quilómetros, normalmente afectados por dobramentos importantes. Podem apresentar possanças elevadas (Anticlinal de Estremoz – Portugal e Alpes Apuan – Itália) ou espessuras reduzidas (Macael – Espanha). A fracturação presente neste tipo de jazidas é, geralmente, composta por várias famílias de descontinuidades.

Dificilmente se encontra, nas jazidas de mármore, um único tipo de material, sendo comum o aparecimento de minerais de diferentes cores, texturas e grãos, dando origem à presença de diversas variedades de mármore comercial.

Em termos mundiais, os principais núcleos de exploração de mármores, e tomando mármores, não no sentido comercial, mas sim no significado científico de calcários cristalinos, encontram-se distribuídos de acordo com o apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Principais núcleos mundiais de exploração de mármore.

Núcleos importantes	Núcleos com alguma expressão	Núcleos sem expressão
Grécia Índia Itália (Carrara) Portugal (Anticlinal de Estremoz)	Argentina Brasil Espanha Estados Unidos da América Jugoslávia Namíbia Noruega Roménia Rússia Turquia Zâmbia	Angola Moçambique

Os principais pólos de exploração de mármore distribuem-se pela cordilheira alpina (pelos Alpes), sendo o mais importante a Itália. Na Índia também existe mármore na cordilheira dos Himalaias. As principais variedades de mármore dos maiores países produtores anteriormente referidos, podem ser observadas, no respeitante à sua coloração, no quadro seguinte.

Quadro 3.2 – Principais variedades de mármores do mundo.
(adaptado de Bradley, 1999)

Países	Cores dos Mármores					
	Brancos	*Rosas*	*Cinzentos*	*Amarelos*	*Verdes*	*Azuis*
Argentina						Azul cielo
Brasil	Branco neve	Chocorosa		Afyon yellow		
E.U.A.	Imperial danby				Vermont green	
Espanha	Blanco macael					
Grécia	Taxos white					
Índia	Ambaji white					
Itália	Bianco carrara; Statuario		Bardiglio carrara; Blu venato d'Itália	Giallo siena	Cipollino apuano; Verde issorie; Verdi issogne	
Jugoslávia	Bianco sivec					
Namíbia	White savana					
Noruega		Norwegian rose				
Portugal	Branco estremoz	Rosa portugal	Azul lagoa; Ruivina		Verde viana	
Turquia	Marmara white		Salomé, Supren			
Zâmbia		Rosa west				

Relativamente a mármores coloridos (rosa, creme, verde, etc.), Portugal deve ser dos países que apresenta maiores reservas, dado que todos os outros grandes produtores de mármores, como a Itália, a Grécia e a Índia, exploram sobretudo mármores brancos e/ou acizentados.

A exportação assume muita importância em países como a Itália, Grécia e Portugal, ao passo que na Índia é o mercado interno que consome a maior parte do material produzido. Todos os restantes pólos referidos não apresentam grande expressão ao nível da produção mundial de mármores.

3.2. CARACTERÍSTICAS DO MÁRMORE

A palavra mármore, deriva etimologicamente do latim, mais propriamente do termo "**marmor**", que, por sua vez, resulta do grego "**marmairein**", que significa rocha de qualidade independente do seu tipo (Mendes, 1974).

Com base nesta definição poderá ser explicado o facto de se utilizar a denominação de mármore para a maioria das rochas carbonatadas (calcários, dolomias, brechas calcárias, travertinos e serpentinitos) como classificação comercial. De acordo com a definição petrográfica, e no seu sentido comercial estrito, o mármore é uma rocha metamórfica contendo mais de 50% de carbonatos (calcite ou dolomite) formada por recristalização de uma rocha carbonatada.

O valor ornamental que qualquer rocha pode apresentar está directamente relacionado com as três características seguintes:

Estéticas:	Determinam o valor comercial da rocha enquanto material ornamental.
Técnicas:	Características que determinam o campo de aplicação do material, bem como o seu modo de fixação.
Explorabilidade:	Condicionam a exploração do recurso existente.

3.2.1. CARACTERÍSTICAS ESTÉTICAS

As características estéticas dos mármores, bem como de outras rochas ornamentais, estão relacionados com a interacção das três seguintes componentes fundamentais: **cor**, **textura** e **granulometria**. Estas características são as mais importantes para a valorização comercial das rochas.

Relativamente à **cor**, o mármore pode ser agrupado em três classes, tal como se mostra no quadro seguinte.

Quadro 3.3 – Classificação do mercado dos vários tipos de mármore de acordo com a sua cor.
(adaptado de Bradley, 1999)

MERCADO	CATEGORIAS DE COR	
Classe 1 - Alta qualidade e médio a alto custo. Mármores caracterizados por cores que são de fácil utilização. Normalmente, a procura excede a oferta. A disponibilidade no mercado é normalmente constante.	Branco Rosa Preto Vermelho Verde	_Clássicos_
Classe 2 - Alta qualidade e médio a alto custo. Mármores caracterizados por cores que têm utilizações limitadas, comparadas com as clássicas. A procura pode variar consideravelmente. Em muitos casos, a disponibilidade no mercado não é constante.	Violeta Amarelo Castanho	_Especiais_
Classe 3 - Média qualidade e custos relativamente baixos. A disponibilidade no mercado deste tipo de mármores é, normalmente, muito boa e quase sempre constante.	Bege ou Creme Cinzento	_Comuns_

A cor do mármore tem diversas origens, derivando, na maior parte dos casos, da existência de impurezas, sob a forma de óxidos, na estrutura das rochas. Os tipos de óxidos e outros componentes presentes, que assumem um papel importante na definição da cor do mármore, são os que se apresentam no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Tipos de óxidos e outras impurezas responsáveis pela coloração dos mármores.
(adaptado de Bradley, 1999)

TIPOS DE ÓXIDOS E OUTRAS IMPUREZAS	COR DO MÁRMORE
Hematite (Fe_20)	Altas concentrações – mármores encarnados Baixas concentrações – mármores rosas
Limonite (Fe_20H_3)	Altas concentrações – mármores castanhos Baixas concentrações – mármore amarelos
Óxido de manganês	Mármores violetas
Pirite magnética (Fe S)	Mármores cinzentos
Clorite e serpentinite	Mármores verdes
Calcite e dolomite com impurezas	Mármores brancos
Refracção da luz nos cristais	Mármores azuis

A **textura dos mármores** está directamente ligada à distribuição espacial dos elementos que constituem a rocha (minerais, clastos, etc.). Quanto a esta característica, os mármores podem ser classificados como: Homogéneos; Venados; Nuvoados; Brechificados e Arabescatos (Bradley, 1999).

O mármore pode ser considerado homogéneo à escala de um ladrilho ou de uma chapa, quando os seus elementos constituintes estão de tal modo distribuídos que a massa pode ser considerada isotrópica.

A produção de ladrilhos ou chapas homogéneas pode ser conseguida em jazidas de mármores não homogéneos através da escolha de uma direcção de corte apropriada. Assim, tal como se pode observar na Figura 3.1 existem três direcções de corte que podem ser adoptadas:

- *Corte "ao contra"* – a superfície de corte é ortogonal à direcção da linha de maior declive da estratificação. Com este tipo de corte, a vergada tende a perder-se, podendo ser caracterizada por desenhos irregulares.
- *Corte "a favor"* – a direcção de corte é paralela à direcção da linha de maior declive da estratificação. Com este corte põe-se em evidência a orientação da vergada existente na rocha.
- *Corte "segundo a vergada"* – a superfície de corte é paralela aos planos de estratificação do material, ou seja, às vergadas. Deste corte, podem resultar superfícies mais ou menos homogéneas ou fazendo desenhos diversos, dependendo da orientação e irregularidade da vergada.

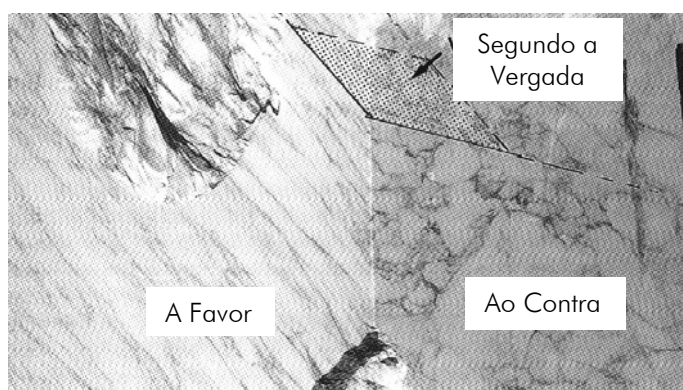



Figura 3.1 – Tipos de cortes em função da direcção em relação à vergada.
(adaptado de Bradley, 1999)

No que diz respeito ao tamanho do grão (granulometria), os mármores podem ser divididos em três classes:

- *Grão fino* – quando os cristais ou outros elementos são impossíveis de identificar a olho nu.
- *Grão médio* – quando os cristais e outros elementos dos minerais podem ser visíveis a olho nu e apresentam tamanho da ordem de um milímetro.
- *Grão grosso* (ou grosseiro) – quando os cristais e outros elementos dos minerais são facilmente visíveis a olho nu e apresentam tamanho da ordem dos dois milímetros ou mais.

Podem ainda ser definidas dimensões intermédias do grão tais como: grão fino a médio e grão médio a grosso.

3.2.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

As características técnicas da rocha condicionam o tipo de uso a dar ao material, bem como os meios de aplicação do mesmo. Estas características são as seguintes:

- *Petrografia* – define as características da génese da rocha e dos minerais que a constituem, bem como as relações recíprocas entre eles na estrutura da rocha. Estas informações são de extrema utilidade na prevenção de alterações do material (variações de cor, alteração da resistência, etc.). Os dados petrográficos devem ser interpretados conjuntamente com a informação mineralógica e química disponível. <u>Estudos a realizar</u>: análise macroscópica e microscópica.
- *Composição mineralógica* – descreve os tipos e as características dos minerais que constituem a rocha. Permite avaliar o comportamento da rocha sobre determinadas condições, sendo indispensável para perceber e prever alterações estéticas (variações de cor, manchas, etc.). <u>Estudos a realizar</u>: análise por difractometria de raio X.
- *Composição química* – define o tipo e percentagem dos elementos químicos presentes na rocha. Fornece informações importantes relativamente à possibilidade de usar a rocha em determinadas condições ambientais (agentes meteóricos, poluição, excrementos de aves, etc.). <u>Estudos a realizar</u>: análises químicas diversas.
- *Propriedades físico-mecânicas* – para poder utilizar uma rocha em termos ornamentais é necessário conhecer as suas propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão, resistência à flexão, resistência ao impacto, resistência ao desgaste, porosidade, etc.), que dão indicações sobre a sua funcionalidade e durabilidade, bem como sobre a sua capacidade de poder ser utilizada em determinadas situações e com determinados modos de aplicação (com ancoragens, cimento, cola, etc.).

3.2.3. EXPLORABILIDADE

Um jazigo mineral, para poder ser considerado com potencial para a indústria das rochas ornamentais, deve ser constituído por rochas com características que lhe possam conferir esse valor, podendo ser do seguinte tipo (lista não exaustiva): mármore; calcário; travertino; ónix; granito; quartzito; arenito; xisto e ardósia; gnaisse; pórfiro; basalto; conglomerado e brecha.

Em termos da abertura de uma exploração de rocha ornamental, há necessidade de determinar as características estruturais do jazigo mineral, incidindo sobre a disposição geométrica da estrutura geológica que o constitui. Tal como foi apresentado anteriormente, também a fracturação existente, que define a compartimentação do maciço rochoso e, consequentemente, a blocometria disponível para exploração, tem de ser alvo de um estudo pormenorizado. Além desta, também os "defeitos" que podem aparecer penalizando a qualidade do material para exploração devem ser estudados. Nos mármores estes fenómenos penalizantes estão geralmente relacionados com zonas de calcite pura (vulgo "dente de cão"), nódulos de quartzo (vulgo "cravo"), zonas dolomitizadas (vulgo "olho de mocho"), entre outras.

Para se poder explorar uma massa mineral com viabilidade económica é necessário que seja satisfeito um conjunto de pré-requisitos, nomeadamente que a qualidade da pedra satisfaça o mercado e apresente boas características em termos dos seguintes factores:

- *Constância das características estéticas* - as características estéticas devem manter-se mais ou menos constantes em toda a jazida.
- *Existência de volumes apreciáveis* - deve existir um volume considerável de rocha com boa qualidade ornamental para que seja viável a abertura da pedreira.
- *Características de produção* – deve conseguir-se produzir blocos com tamanhos e formas capazes de tornar economicamente viável a exploração. Nesta matéria é importante o grau de fracturação do maciço rochoso.
- *Prazo de entrega* – a capacidade produtiva instalada na pedreira deve ser capaz de satisfazer a procura e os prazos de entrega.

3.3. CARACTERÍSTICAS DAS PEDREIRAS

Uma pedreira pode ser definida, quanto à sua tipologia, com base nos três parâmetros seguintes:

Forma	- Em subterrâneo ou a céu aberto
Localização geomorfológica:	- Planície ou montanha
Método de desmonte	- Um ou vários pisos

A *forma da pedreira* é determinada pela morfologia do jazigo mineral e pela acessibilidade ao mesmo. Esta característica pode influir de um modo notável no tipo de maquinaria a utilizar, no custo, nos valores e nas características de produção. As principais diferenças entre as duas formas de exploração são as que se apresentam no Quadro 3.5.

A *localização geomorfológica* é função do ambiente geomorfológico onde se implanta a pedreira. Esta localização pode ter lugar num terreno mais ou menos plano (planície) ou numa zona de relevo mais ou menos acentuado (montanha). As pedreiras de planície, tais como as do Alentejo, desenvolvem-se em fossa ou poço, apresentando vantagens em termos ambientais, devido ao facto das cavidades serem pouco visíveis, mas são penalizadas devido aos impactes causados pelas suas escombreiras. A localização de uma pedreira numa montanha pode assumir três situações distintas; no sopé da montanha, no meio da sua encosta ou no seu topo, assumindo, qualquer uma delas diferentes condições de acesso, transporte, colocação de escombros, impactes ambientais, produções, entre outros.

O *método de desmonte* define a sequência de operações que permite a produção de blocos. O método é estabelecido em função das características do jazigo mineral (possança, orientação e inclinação da camada a desmontar, entre outros) e da necessidade de produção, influenciando significativamente o tipo de maquinaria a utilizar e a organização logística da área a explorar. A exploração pode ser efectuada num único piso ou em vários pisos, cuja altura e número são função, essencialmente, da possança da camada a explorar e/ou do grau de fracturação presente na jazida, devendo respeitar as regras de segurança e a legislação vigente. Assim tem-se:

- Camada a explorar pouco possante – explora-se num piso único
- Camada a explorar muito possante – explora-se em vários pisos
    - *Fracturação intensa* – altura do piso maior
    - *Fracturação pouco frequente* – altura do piso menor

Quadro 3.5 – Vários tipos de pedreiras atendendo à forma e localização geomorfológica da exploração.

TIPOS DE EXPLORAÇÃO	VARIANTES	DESCRIÇÃO	ILUSTRAÇÃO
Céu Aberto	Flanco de Encosta(*)	A lavra começa a partir de um nível na encosta de um monte ou montanha e evolui para níveis superiores ou inferiores, aproveitando a topografia do terreno.	MONTANHA; Sem qualidade; Mármore; Avanço
	Poço ("*Open Pit*")	A lavra começa a partir da superfície do terreno e é descendente, originando a formação de poços.	PLANÍCIE; Avanço; Mármore
Subterrâneo	Flanco de encosta(*)	A exploração realiza-se através da abertura de galerias subterrâneas, sendo neste caso o acesso à jazida efectuado na encosta de um monte ou montanha.	MONTANHA; Sem qualidade; Mármore; Avanço
	Profundidade	O acesso à jazida é realizado através de uma rampa ou poço vertical, ou de um processo combinado de poço e rampa.	PLANÍCIE; Poço; Rampa; Galerias
Misto	Flanco de encosta(*)	São combinados os desmontes a céu aberto e o subterrâneo, sendo estes realizados na encosta de um monte ou montanha. Geralmente, já existe a exploração a céu aberto, no entanto, pode acontecer que numa dada direcção de avanço da exploração, esta não se mostre viável, iniciando-se a exploração em subterrâneo embora a exploração a céu aberto continue noutras direcções.	MONTANHA; Sem qualidade; Mármore; Avanços
	Profundidade	O desmonte misto em profundidade resulta, em geral, de motivos semelhantes aos descritos para o flanco de encosta, com a diferença de se iniciar em profundidade a partir de uma exploração em poço.	PLANÍCIE; Avanços; Sem qualidade; Mármore

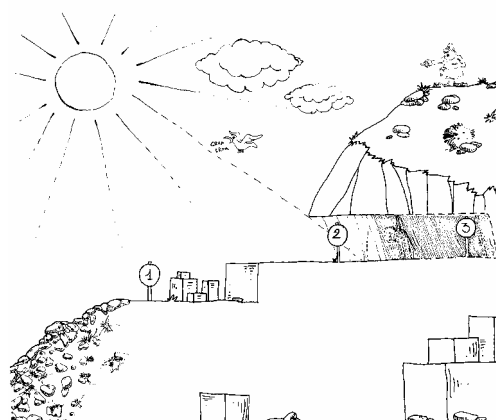
(*) – Os desmontes em flanco de encosta não são característicos do Anticlinal dada a topografia plana do mesmo.

O desmonte em subterrâneo utiliza as técnicas do desmonte a céu aberto depois de criado o primeiro piso, ou seja, durante a fase de rebaixo. Por outro lado, para abrir o primeiro piso (piso de entrada) é necessário construir uma galeria cujas dimensões são função dos equipamentos a utilizar, das produções pretendidas e da morfologia da jazida, entre outros, tal como se mostra nas Figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.2 – Definição da galeria de entrada com o canal desmontado.
(fonte: Bradley, 1999)

Figura 3.3 – Derrube de uma talhada na zona de rebaixo da exploração.
(fonte: Bradley, 1999)

Além dos métodos anteriormente referidos, existe ainda uma variante do método de desmonte em subterrâneo que consiste num avanço relativamente pequeno das galerias para o interior do maciço, o qual pode ser utilizado para explorar pequenas porções de mármore existentes na zona dos taludes dos desmontes a céu aberto.

Este tipo de desmonte tem sido utilizado pelos Italianos na exploração de rochas ornamentais, mais propriamente nos mármores, o qual foi por estes intitulado de desmonte "*Sotto Tecchia*" (debaixo de telha), diferindo do subterrâneo pelo facto dos trabalhos poderem ser realizados com luz natural e sem necessidade de ventilação, devido à proximidade da entrada relativamente às frentes de desmonte. Na figura seguinte apresenta-se uma ilustração com este tipo de desmonte, comparando-o com o céu aberto e com o subterrâneo.

Legenda:

← - Desmonte a céu aberto

↑ - Desmonte "Sotto Tecchia"

→ - Desmonte subterrâneo

Figura 3.4 – Representação comparativa do método de desmonte "*Sotto Tecchia*".

(adaptado de Capuzzi *et al.*, s/d)

3.4. FASES DO DESMONTE A CÉU ABERTO

O único método de desmonte utilizado até há cerca de três anos no Anticlinal de Estremoz era a exploração a céu aberto, em poço, altura em que se iniciou a primeira exploração em subterrâneo. Na exploração a céu aberto, a altura das bancadas é variável, não devendo ir além dos 6 m de altura, de acordo com a legislação actualmente em vigor para esta zona.

As várias fases e operações que compõem o desmonte a céu aberto encontram-se apresentadas no fluxograma da Figura 3.5, sendo a descrição e ilustração das mesmas apresentadas nos quadros seguintes.

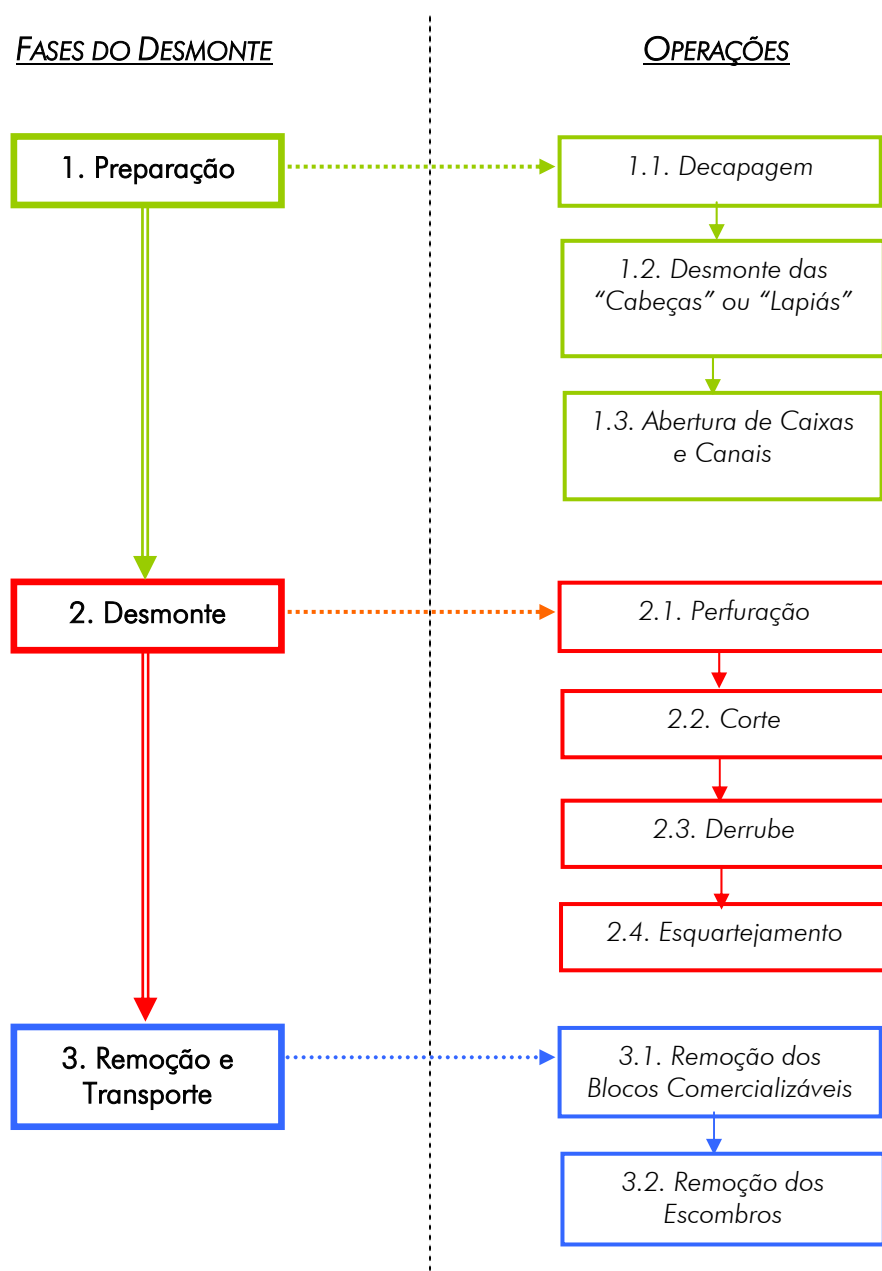



Figura 3.5 – Fluxograma das fases e operações de desmonte de mármores a céu aberto.

Quadro 3.6 – Fase de preparação do desmonte a céu aberto.

<table>
<tr><td colspan="3">1. Preparação</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>1.1. DECAPAGEM</u></td></tr>
<tr><td>Descrição</td><td>Ilustração</td><td>Equipamentos</td></tr>
<tr><td>Desmatagem e remoção da terra superficial que cobre total ou parcialmente a massa mineral, de modo a aceder à mesma.</td><td>
Aspecto das "cabeças" de mármore depois de removida parte da terra de cobertura</td><td>Pá carregadora (desmatagem)
Escavadora (desmatagem e remoção e carregamento de terras)
Dumpers (transporte de materiais)</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>1.2. DESMONTE DAS "CABEÇAS" OU LÁPIAS</u></td></tr>
<tr><td>Descrição</td><td>Ilustração</td><td>Equipamentos</td></tr>
<tr><td>Corte e desmonte das "cabeças" de mármore que foram destapadas, de modo a criar um piso de trabalho regular.</td><td>
Primeiro piso de desmonte após extracção das "cabeças" de mármore</td><td>Martelo pneumático (perfuração)
Máquina de fio diamantado (corte)
Explosivos (desmonte de material sem qualidade)
Martelo hidráulico equipado na escavadora (fragmentação das "cabeças")</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>1.3. ABERTURA DE CAIXAS E CANAIS</u></td></tr>
<tr><td>Descrição</td><td>Ilustração</td><td>Equipamentos</td></tr>
<tr><td>A abertura da caixa permite a criação de duas faces livres para o desmonte da rocha, enquanto a realização de canais perpendiculares entre si origina uma terceira face livre e define a massa a desmontar. Estas operações permitem iniciar a exploração de um novo piso.</td><td>
Aspecto de um canal realizado numa bancada</td><td>Perfuradora (perfuração)
Martelo pneumático (perfuração)
Máquina de fio diamantado (corte)
Roçadora de bancada (corte)
Grua (extracção)</td></tr>
</table>

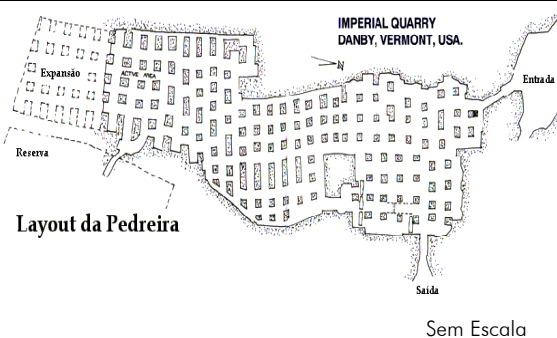
Quadro 3.7 – Fase de desmonte a céu aberto.

<table>
<tr><th colspan="3">2. Desmonte</th></tr>
<tr><td colspan="3"><u>2.1. PERFURAÇÃO</u></td></tr>
<tr><td>Descrição</td><td>Ilustração</td><td>Equipamentos</td></tr>
<tr><td>Realização de furos horizontais e verticais que delimitam a massa a desmontar e as respectivas talhadas de rocha.</td><td>Realização de um furo horizontal para passar o fio diamantado</td><td>Perfuradora
Martelo pneumático</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>2.2. CORTE</u></td></tr>
<tr><td>Descrição</td><td>Ilustração</td><td>Equipamentos</td></tr>
<tr><td>Corte da rocha para individualizar as talhadas:
1- corte de levante
2- corte vertical posterior
3- cortes verticais laterais.</td><td>Corte de levante com a máquina de fio diamantado</td><td>Máquina de fio diamantado
Roçadora (é geralmente utilizada para realizar o corte de levante)</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>2.3. DERRUBE</u></td></tr>
<tr><td>Descrição</td><td>Ilustração</td><td>Equipamentos</td></tr>
<tr><td>As talhadas de rocha, depois de individualizadas, são derrubadas para cima de uma "cama" feita de terras, escombros e/ou pneus.</td><td>Derrube de uma talhada com a pá carregadora</td><td>Colchões (pneumáticos ou hidráulicos)
Macacas hidráulicas
Escavadora
Pá carregadora (equipada com lança)</td></tr>
<tr><td colspan="3"><u>2.4. ESQUARTEJAMENTO</u></td></tr>
<tr><td>Descrição</td><td>Ilustração</td><td>Equipamentos</td></tr>
<tr><td>Divisão da talhada derrubada em blocos de dimensões transportáveis, quando a fracturação existente não é suficiente para tal.</td><td>Esquartejamento do bloco com a máquina de fio diamantado</td><td>Máquina de fio diamantado
Martelo pneumático e guilhos</td></tr>
</table>

Quadro 3.8 – Fase de remoção e transporte no desmonte a céu aberto.

3. Remoção e Transporte		
3.1. REMOÇÃO DOS BLOCOS COMERCIALIZÁVEIS		
Descrição	Ilustração	Equipamentos
Carregamento e transporte dos blocos com qualidade ornamental e com dimensões comercializáveis para o parque de blocos da pedreira.	*Transporte de blocos comercializáveis para o parque de blocos*	Pá carregadora (carregamento e transporte em pequenas distâncias) Grua (extracção)
3.2. REMOÇÃO DE ESCOMBROS		
Descrição	Ilustração	Equipamentos
Carregamento e transporte de escombros da zona da frente da pedreira até à escombreira.	*Transporte dos escombros para a escombreira*	Escavadora (carregamento) Pá carregadora (carregamento) *Dumpers* (transporte) Gruas equipadas com balde (extracção dos escombros)

3.5. EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES

Neste capítulo são apresentados os núcleos mundiais de exploração subterrânea de mármores de maior importância e os principais métodos de desmonte aplicáveis a este tipo de recurso mineral, com o intuito de analisar a possível aplicação, dos conhecimentos adquiridos nesses núcleos e dos métodos de desmonte praticados, à lavra subterrânea a desenvolver no Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa.

3.5.1. PRINCIPAIS NÚCLEOS MUNDIAIS

Os principais núcleos mundiais de exploração de mármores em subterrâneo situam-se em Itália (Carrara) e nos Estados Unidos da América (Danby). No Quadro 3.9 encontram-se sintetizadas as características mais importantes destes dois núcleos.

Quadro 3.9 – Principais núcleos de exploração de mármores em subterrâneo.

CARACTERÍSTICAS	CARRARA	DANBY
Localização	Em Carrara, região da Toscana em Itália, das cerca de 220 pedreiras existentes, aproximadamente, 50 desenvolvem os trabalhos em subterrâneo. Este tipo de explorações tende a aumentar no futuro devido à presença de fracturas nas bancadas superficiais.	Trata-se de uma única pedreira situada em Danby, no estado de Vermont nos Estados Unidos da América. Esta pedreira desenvolve-se na encosta da "*Dorset Mountain*". A exploração iniciou-se em 1905 e é actualmente a maior pedreira subterrânea de mármores do mundo.
	Aspecto do relevo da região	Aspecto do relevo da região
Geologia	Montanha formada por calcários cristalinos datados do Lias Inferior (Jurássico). Os mármores desta região apresentam cores que variam entre o branco e o cinzento, e por vezes apresentam também tons esverdeados.	A camada de calcário cristalino em exploração apresenta cerca de 25 m de espessura, inclinando cerca de 8° para Sul. Está rodeada a tecto por xistos e a muro por calcários dolomiticos. Esta camada forma um geossinclinal e aflora na encosta da montanha. O mármore está datado do Ordovícico (350 MA), apresentando-se pouco fracturado. As colorações variam entre o branco, passando pelo branco com vergada cinzenta-acastanhada, e terminando no mármore cinzento com vergada xistenta acinzentada.
Dimensão das Explorações	Os desmontes apresentam câmaras de dimensões que variam desde 20×30 m^2 a 150×20 m^2 , existindo em alguns casos uma câmara única e noutros são deixados pilares, embora sem uma distribuição equidistante entre eles, sendo frequente a existência de diafragmas ou paredões a separar as câmaras.	A exploração desenvolve-se por uma área de cerca de 6.5 ha e apresenta câmaras com 15 m e pilares quadrados com 7-8 m de lado, mais ou menos regulares.
Método de Desmonte	As explorações desenvolvem-se em subterrâneo, em flanco de encosta, sendo o método utilizado o de Câmaras e Pilares. As fases de desmonte englobam a entrada em galeria e posteriores trabalhos de rebaixo, utilizando as técnicas do céu aberto. As galerias apresentam alturas da ordem dos 3 m e os rebaixos são realizados segundo alturas de 6 m.	A exploração subterrânea desenvolve-se em flanco de encosta, à semelhança do que acontece em Carrara, uma vez que existe uma elevada espessura relativamente sã da camada de mármores, intercalada entre material estéril. Antigamente, a lavra avançava em galeria dentro do xisto para pôr a descoberto a camada de mármore. Hoje em dia, a galeria é directamente escavada no mármore com auxílio de roçadoras de galeria. Depois de entrar em galeria é realizado o rebaixo do desmonte, através das técnicas utilizadas no céu aberto. A exploração avança com pisos da ordem dos 4 a 5 m de altura, de modo a definir as várias qualidades de mármore presentes na camada.

-- Continua --

-- Continuação --

CARACTERÍSTICAS	CARRARA	DANBY
Equipamentos	Os equipamentos mais utilizados são: roçadora de galeria, roçadora de bancada, máquina de fio diamantado, pá carregadora e escavadora giratória.	Utilizam-se roçadoras, máquinas de fio diamantado, pás carregadoras, uma escavadora. No derrube são utilizados colchões hidráulicos.
Trabalhadores	O número de trabalhadores situa-se, em média, entre os 5-6 por pedreira	Actualmente, o trabalho de lavra é realizado por 13-14 trabalhadores.
Dimensões das Talhadas	Na ordem dos 6×3×2.5 m^3 no desmonte em galeria. No rebaixo podem apresentar maiores dimensões.	As talhadas apresentam dimensões médias de 6×3.2×2 m^3 na entrada em galeria, e de aproximadamente 5×2×10 m^3, nas operações de rebaixo.
Dimensões dos Blocos	As dimensões dos blocos definem volumes de cerca de 8 -9 m^3	Os blocos extraídos apresentam as seguintes dimensões médias: 3×1.6×2 m^3.
Recuperação Média	A recuperação média das pedreiras de Carrara situa-se entre os 60 e 80%.	A recuperação atingida na pedreira apresenta um valor médio de 75%.
Rendimento Médio	O rendimento apresenta valores na ordem dos 25-30%, chegando excepcionalmente aos 40 %.	Apresenta valores da ordem dos 30-35%.
Produção Média	A produção média nas pedreiras subterrâneas varia entre as 5000-10000 ton/ano.	Situa-se na ordem dos 400 m^3/mês.
Sistemas de Sustimento	Os sistemas de sustimento mais utilizados, para além dos pilares esteios e dos paredões, são com alguma frequência as pregagens, os cabos e as redes metálicas.	Utilizam pregagens do tipo Swellex com vários comprimentos.
Esquemas e Fotografias	Várias entradas das explorações subterrâneas	IMPERIAL QUARRY DANBY, VERMONT, USA. Layout da Pedreira. Sem Escala

Além dos núcleos anteriormente apresentados, existem, a nível mundial, outras zonas onde se exploram rochas ornamentais em subterrâneo, mesmo mármores, embora com menor significado. No que respeita ao mármore existem explorações em subterrâneo, em estado inicial, noutras regiões do mundo, como é o caso da Grécia e de Portugal. Em Portugal, o Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa começou a ser explorado em subterrâneo há sensivelmente três anos, existindo neste momento cerca de cinco explorações com lavra subterrânea. Na Áustria e na Noruega também existem explorações subterrâneas de rochas ornamentais, e tal como no caso Português e Grego, este tipo de exploração encontra-se numa fase inicial. Nestes países, não existe ainda um grande conhecimento adquirido que permita a recolha de informações, quer em termos do desempenho enquanto unidade extractiva, quer em termos de problemas de estabilidade ou outros que possam ocorrer, com vista à sua extrapolação para situações similares.

A Itália assume actualmente um papel de protagonismo na ocorrência de explorações subterrâneas de rochas ornamentais. As principais regiões onde estas aparecem encontram-se representadas na Figura 3.6. Da análise dessa figura pode observar-se que a maior concentração de explorações subterrâneas se regista no norte deste país, o que é compreensível dado o relevo montanhoso mais propício a este tipo de exploração.

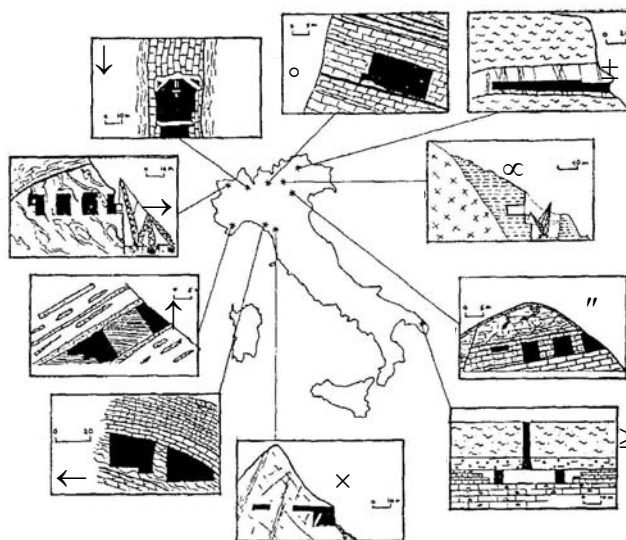



Figura 3.6 – Distribuição dos principais núcleos de exploração subterrânea de rochas ornamentais em Itália.
(fonte: Fornaro e Bosticco, 1998)

No Quadro 3.10, apresentam-se as características para cada um dos tipos de explorações anteriormente ilustrados, em termos de materiais explorados, de níveis de produção e dos principais problemas de lavra com que se deparam.

Em Portugal, existe, desde há muitos anos, uma exploração de ardósias (lousas) em subterrâneo, que foi iniciada no século XIX e que era, até à três anos atrás, a única pedreira subterrânea de rochas ornamentais existente no país. Por este facto, e dada a particularidade do método de desmonte utilizado, apresenta-se no Anexo I um resumo das suas características geológicas e do método de desmonte, bem como uma ilustração dos desmontes.

3.5.2. MÉTODOS DE DESMONTE

Os principais métodos de desmonte em subterrâneo assentam em três técnicas mineiras distintas, nomeadamente:

- Desmonte com entulhamento - a estabilidade do maciço após o desmonte é assegurada pelo entulhamento das cavidades;
- Desmonte com desabamento – o material é desmontado através da rotura controlada dos terrenos à medida que se aumentam os vazios;.
- Desmonte com abandono de pilares – são deixados pilares de rocha abandonados que garantem a estabilidade do maciço.

A conjugação destas três técnicas permite estabelecer um conjunto de métodos de desmonte que hoje em dia se conhecem na indústria extractiva subterrânea (corte e enchimento, frentes corridas, câmaras e pilares, entre outros).

Quadro 3.10 – Características dos principais núcleos de exploração subterrânea de rochas ornamentais em Itália.

(adaptado de Fornaro e Bosticco, 1998)

TIPO DE JAZIDA	TAXA DE RECUPERAÇÃO (%)	RENDIMENTO EM BLOCOS (%)	PRODUÇÃO ANUAL (m^3/ANO)	PROBLEMAS EXISTENTES NA EXPLORAÇÃO
1. Calcário (Portoro) Estrutura em anticlinal. Possança de 20 m. Cobertura de 25 a 60 m.	70	< 50	> 150	Problemas geomecânicos (falhas, fracturas, e outros), perda de qualidade, necessidade de controlo do auto-suporte do estrato do tecto.
2. Ardósia (Liguria) Inclinação das bancadas de 20 a 30 °. Possança de 10 m e profundidade de 40 a 60 m.	70	30	400	Problemas na jazida (falhas, fracturas, falta de homogeneidade, inclusões, etc.).
3. Oficalcite Verde (Vale da Aosta) Rocha metamórfica alpina em contacto com calcoxisto.	65 - 70	60	< 250	Estabilidade das câmaras no contacto com o calcoxisto. Fracturas persistentes.
4. Mármore (Candoglia) Camadas subverticais. Possança de 20 m.	100	25	> 100	Reservas limitadas (do mármore de melhor qualidade). Necessidade de controlo da cavidade e de consolidação progressiva.
5. Brecha arabescata (Orobica) Inclinação de 15 a 20°. Possança de 9 a 10 m. Cobertura de 80 a 100 m.	< 80	60	> 450	Variação de qualidade do material (desenho, cor, etc.). Presença de tectos falsos (cavidades cársicas).
6. Mármore (Lasa) Camadas subhorizontais. Possança de 40 m. Cobertura de 30 a 100 m.	70	40	150-200	Estabilidade das cavidades mais antigas e controlo geotécnico dos novos desmontes.
7. Arenito calcário (Berica) Camadas ligeiramente inclinadas (<10°). Possança de 10 a 14 m e cobertura de 50-60 m.	75	70-80	450	Falhas e fracturas no tecto dos desmontes. Fenómenos cársicos.
8. Tufo calcário (Cutrofiano) Estratos horizontais. Possança de 15 a 25 m.	> 60	60-80	300-400	Acesso ao fundo. Possança insuficiente do tecto e consequentes fenómenos de subsidência.
9. Mármore (Apuan) Corpos metamórficos de dimensões variáveis. Cobertura da ordem de 100 m.	60-80	30-40	> 900	Variação da qualidade comercial. Controlo da estabilidade da escavação. Interferência entre as cavidades e os tectos.
10. Conglomerado (L. Iseo) Possança de 50 m ou mais. Cobertura limitada.	60	65	≈ 400	Variação na qualidade do material (granulometria, litologia, etc.).

Na lavra subterrânea de mármores a viabilidade económica da exploração é fortemente influenciada pela blocometria disponível, o que impede, à partida, o recurso a métodos de desmonte que assentem na técnica de desabamento, dada a indução de fracturação que tal técnica origina e consequente diminuição das dimensões dos blocos comerciais.

O entulhamento também não se prefigura como uma técnica de aplicação directa ao caso dos mármores, embora possa ser utilizada em determinados casos para resolver problemas de instabilidade que surjam nas cavidades, nomeadamente quedas pontuais de blocos ou até mesmo situações de aluimentos. Nestes casos, quando não for viável a aplicação de outro tipo de sustimento ou não exista material para explorar na zona em causa, poderá ser importante a utilização de escombros para entulhar as cavidades e assim estabilizar os desmontes.

A técnica de abandono de pilares parece ser a mais adequada à exploração deste tipo de recurso, uma vez que possibilita a definição de elementos de suporte naturais em zonas do maciço onde o material é de qualidade inferior, permitindo, além disso, dimensionar os pilares de modo a evitar a presença de fracturação induzida pela abertura das cavidades de desmonte. A utilização desta técnica na lavra de pedreiras poderá apresentar uma distribuição espacial irregular dos pilares, em função da heterogeneidade do jazigo mineral relativamente à sua qualidade ornamental.

Para seleccionar o método de exploração em subterrâneo a adoptar, devem atender-se vários factores, tais como:

- Características geológicas do local;
- Morfologia;
- Espessura e inclinação das camadas de mármore;
- Continuidade da jazida;
- Profundidade a que se encontra;
- Factores económicos (infra-estruturas, investimentos iniciais, etc.).

Só após a obtenção de informação sobre os aspectos anteriormente referidos, se deverá proceder à escolha do método de desmonte a utilizar, bem como ao dimensionamento do mesmo. Nos capítulos seguintes apresentam-se os principais métodos que poderão ser utilizados na exploração subterrânea de mármores, nomeadamente o método de câmaras e pilares e frentes corridas.

3.5.2.1. CÂMARAS E PILARES

Do conjunto dos métodos de desmonte tradicionais, resultantes das técnicas referidas no capítulo anterior, o desmonte com abandono de pilares é o único, à partida, que oferece melhores resultados, atendendo à especificidade da exploração subterrânea de mármores, em termos da conservação da integridade do maciço rochoso adjacente. Qualquer uma das outras duas técnicas referidas, permite a fracturação do maciço rochoso, e até mesmo a sua rotura, o que provavelmente conduziria à inviabilização da exploração.

O Método de Câmaras e Pilares consiste em desmontar a rocha, deixando *in situ* (por desmontar), determinadas fracções isoladas de rocha da jazida, as quais constituem pilares que exercem a função de suporte do terreno sobrejacente em toda a área interessada pela escavação. Este tipo de

método de desmonte deve ser dimensionado, tendo como base o compromisso entre a segurança e o aproveitamento económico máximo do jazigo mineral. A segurança e a taxa de recuperação estão directamente ligados às dimensões dos pilares que são abandonados e das câmaras que são exploradas.

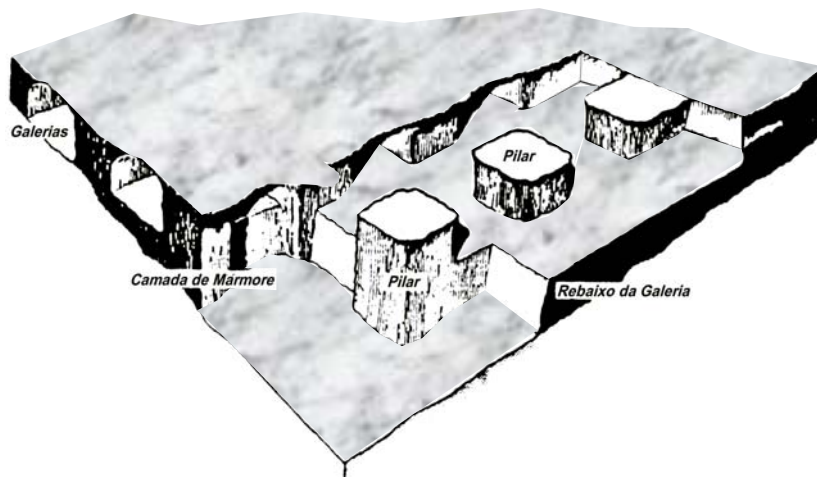



Figura 3.7 – Ilustração do método de desmonte por câmaras e pilares.
(adaptado de Hartman, 1992b)

O dimensionamento de desmontes pode ser realizado através da teoria da área tributária e/ou por métodos de análise numérica, nomeadamente utilizando programas computacionais do método de elementos finitos e método das diferenças finitas, entre outros, que serão apresentados adiante.

A maioria das pedreiras de mármore e de outros tipos de rocha ornamental, com exploração subterrânea, recorre a métodos de desmonte por câmaras e pilares, essencialmente, devido aos seguintes aspectos:

- Os elementos de suporte são os pilares (mais barato);
- Os pilares podem ser dimensionados de modo a não existir fracturas induzidas no maciço (factor de segurança salvaguardando a integridade do jazigo mineral do ponto de vista da fracturação);
- Permitem em geral uma recuperação aceitável (entre 60 – 90 %);
- Existe a possibilidade de deixar pilares em zonas em que o material não é de tão boa qualidade;
- Pode-se utilizar a maior parte do equipamento de céu aberto, pois permite cavidades de grandes dimensões;

Este método é caracterizado pela existência de galerias rectas e paralelas, embora existam por vezes variantes do método, em que este paralelismo não existe em virtude das características do jazigo mineral. Os pilares que normalmente são deixados podem ser de secção rectangular ou quadrada. Em muitas explorações Italianas é, no entanto, utilizada uma variante do método de câmaras e pilares no qual se formam câmaras de grandes dimensões separadas por pilares barreira, ao invés da malha regular de pilares apresentada anteriormente na Figura 3.7.

3.5.2.2. FRENTES CORRIDAS

Além do método de câmaras e pilares existem outros métodos que poderiam eventualmente ser estudados com vista à sua utilização na exploração subterrânea de mármores, tal como o *Método das Frentes Corridas*, caracterizado por possuir frentes de desmonte compridas, sendo a estabilidade garantida através de elementos de suporte artificial (pilares de madeira, cimento, mármore ou outros) ou do entulhamento das cavidades. Dadas as características deste método, a sua aplicação só poderá ser útil no caso de explorações profundas e com grandes dimensões. Na figura seguinte é possível observar uma ilustração do método das frentes corridas.

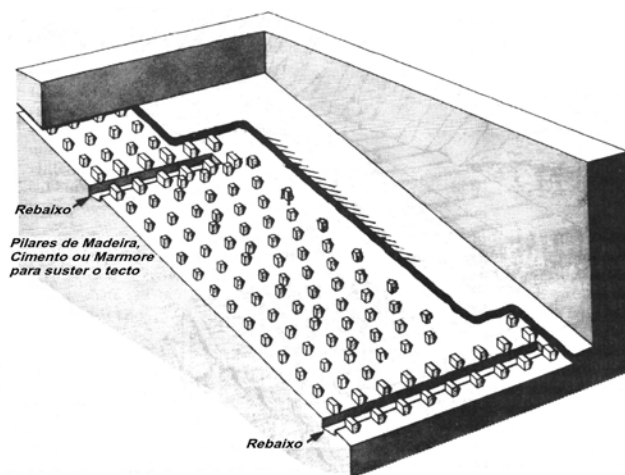



Figura 3.8 – Ilustração do método de desmonte por frentes corridas.
(adaptado de Hartman, 1987)

A aplicação deste método na exploração de mármores em Portugal, apresenta alguns problemas dada a complexidade geológica do Anticlinal de Estremoz, que será objecto de estudo no capítulo 4.1.2. Contudo, poderá ser equacionada a sua utilização em determinadas zonas do Anticlinal, para exploração de mármore a grandes profundidades. Dadas as limitações da sua aplicação na abertura de explorações subterrâneas pouco profundas, a partir de explorações a céu aberto já existentes, este método não será alvo de uma análise muito aprofundada, embora se apresentem, a seguir, as suas principais vantagens e desvantagens (baseado em Bieniawski, 1987):

Vantagens:

- Permite uma lavra contínua;
- Possibilita elevadas velocidades de extracção;
- Garante um bom controlo de subsidência;
- Apresenta alguns benefícios colaterais (não necessita de ancoragens, melhor ventilação, mais espaço para os equipamentos, etc.);
- Aproveita os escombros para suporte dos tectos (pilares artificiais ou entulhamento).

Desvantagens:

- Impraticável nos moldes tradicionais perto da superfície devido à dimensão das cavidades e aos elevados custos do sustimento;
- Indução de fracturação no maciço devido aos elevados vãos das câmaras de desmonte;
- Inviabilização da reutilização das cavidades mineiras para outros fins.

4. CARACTERIZAÇÃO DO ANTICLINAL DE ESTREMOZ-BORBA-VILA VIÇOSA

4.1. O ANTICLINAL DE ESTREMOZ-BORBA-VILA VIÇOSA

4.1.1. LOCALIZAÇÃO

O Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa situa-se no Alentejo, mais propriamente no distrito de Évora. Possui forma elíptica com cerca de 40 km no eixo maior e 7 km no eixo menor, e está orientado segundo NW-SE, começando em Sousel e acabando no Alandroal, tal como se pode observar na figura seguinte.

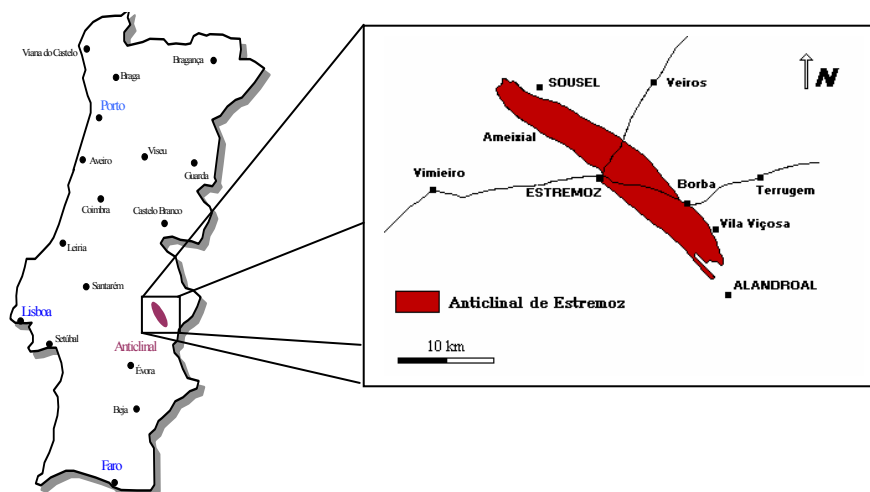



Figura 4.1 – Localização geográfica do Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa.

Em termos de coordenadas geográficas, esta estrutura está localizada a uma latitude entre 38°44'N e 38°51'N e uma longitude variando entre 7°23'W e 7°36'W. As povoações mais importantes desta faixa marmórea são Estremoz, Vila Viçosa, Borba, Rio de Moinhos e Bencatel. O Anticlinal apresenta cotas que variam entre 300 m, nas zonas mais baixas, e 500 m nos locais mais altos, sendo frequentes cotas em torno dos 400 m.

No que respeita às vias de comunicação, esta zona é atravessada por várias estradas e caminhos que ligam as povoações existentes. Como principais vias de comunicação para o exterior destacam-se a Auto-estrada A6 (Lisboa – Elvas) e a Estrada Nacional n.° 4, bem como uma linha de caminho de ferro que se encontra, desde à algum tempo inactiva.

Em termos geográficos as cartas que apresentam a zona do Anticlinal são as folhas n.[os] 426, 440 e 441 da Carta Militar, à escala 1:25.000, dos Serviços Cartográficos do Exército.

O Anticlinal de Estremoz encontra-se cartografado nas cartas geológicas 36D-Redondo e 36B-Estremoz, dos serviços Geológicos de Portugal, à escala 1:50.000. Recentemente foram publicadas cartas geológicas temáticas do Anticlinal à escala 1:10.000, por parte do Instituto Geológico e Mineiro, o que constitui um avanço importante no conhecimento geológico e na cartografia do Anticlinal.

4.1.2. GEOLOGIA

4.1.2.1. ESTRATIGRAFIA

O Anticlinal de Estremoz integra-se no Maciço Hispérico mais propriamente na zona de Ossa-Morena, no sector tectono-estratigráfico de Estremoz – Barrancos, tal como se mostra na Figura 4.2.

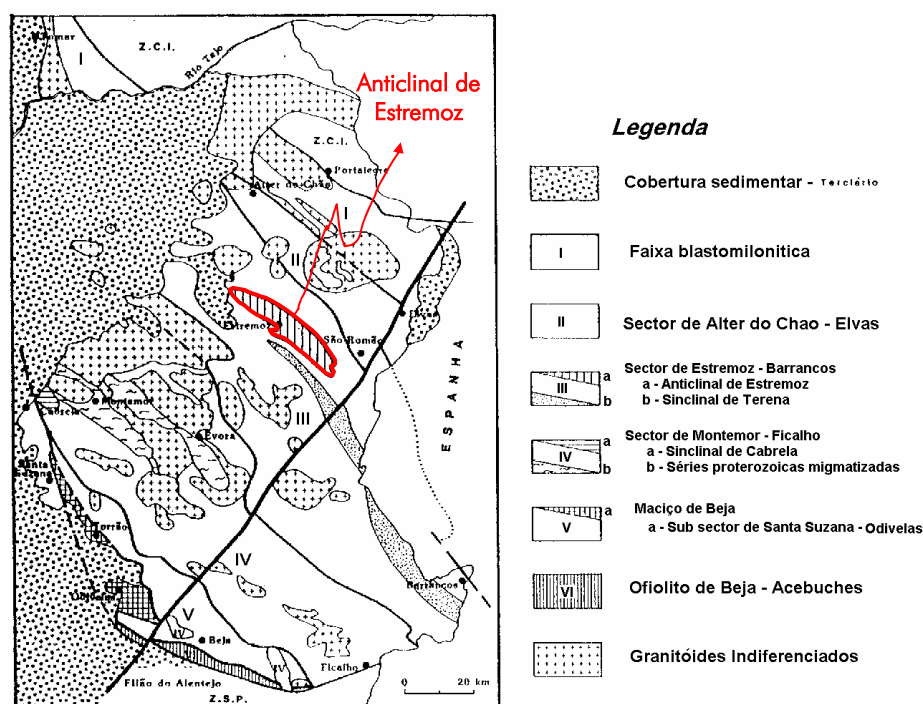



Figura 4.2 – Sectores tectono-estratigráficos da zona Ossa – Morena em Portugal.

(adaptado de Reynaud e Vintém, 1994)

As formações que integram a zona em estudo, ou seja, o Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa, e segundo Gonçalves (1974), são as que se apresentam no Quadro 4.1.

A idade da formação dos mármores (calcário cristalino) ainda motiva divergências entre os vários autores que têm vindo a estudar esta zona, dada a ausência de fósseis. Carvalhosa *et al.* (1987), divide as formações do Anticlinal nas seguintes unidades geológicas:

Proterozóico Superior - Formação dos mares (Ma)
Câmbrico Inferior - Formação dolomítica de Estremoz (dEs)
Ordovícico (?) - Complexo vulcano-sedimentar de Estremoz
Silúrico – Xistos com liditos

Quadro 4.1 – Formações geológicas presentes no Anticlinal de Estremoz.

(adaptado de Gonçalves, 1974)

DA BASE PARA O TOPO	
Pré Câmbrico (PE) superior	Xistos negros e xisto arenito – grauvacóides. Com intercalações, por vezes, de quartzitos negros e liditos. Este conjunto encontra-se fortemente dobrado e aflora na parte axial do Anticlinal. Designam-se por "xistos dos mares".
Câmbrico Inferior (Cb1)	Conglomerado de base, silificado em elementos que podem atingir os 40 cm de diâmetro. Assentam em discordância com os "xistos dos mares". Afloram nos flancos do Anticlinal.
	Calcários cristalinos de grão fino e muito xistificados na parte inferior, alternando ou passando lateralmente a dolomitos primários. Dolomitos e calcários dolomitizados denominados na região de "pedra cascalva".
	Mármores calcitícos de grão médio a fino, cor clara variando entre o branco , creme, rosa, cinzento. Estes mármores apresentam-se geralmente pouco xistificados. Em algumas zonas estes mármores encontram-se dolomitizados à superfície, através de dolomitização recente e secundária, que foi condicionada pela xistosidade e pela fracturação. A estas zonas de dolomitos secundários dá-se o nome de "Olho de mocho".
Silúrico (S)	Xistos com intercalações de liditos e xistos grafitosos. Tratam-se de xistos luzentes, cinzentos esverdeados ou cor de borra de vinho, com quartzo alterado com grauvaques. Assenta directamente sobre a série carbonatada câmbrica. Na base desta série existem metavulcanitos que se apresentam a ladear o maciço calcário ou associados a estes nas zonas de sinclinal.
Devónico (D) (médio ou superior)	Conglomerados sobrepostos por xistos, alternando estes com grauvaques.
Plio – Plistocénico (PQ)	Areias e cascalheiras de matriz avermelhada.
Plistocénico	Calcário lacustre, por vezes brechóides, que assentam em discordância sobre os terrenos antigos. Estes afloramentos situam-se na periferia do maciço calcário.
Rochas filonianas	Filões de várias naturezas (doleriticos, etc.) e com diversas estados de alterações. Apresentam em geral orientações NE-SW e ENE–WSW.

Na Figura 4.3 apresenta-se a correlação entre estas unidades e as descritas por Gonçalves (1974) e que foram apresentadas no quadro anterior, verificando-se que existe uma dúvida sobre a idade de formação do mármore (Câmbrico ou Ordovícico?).

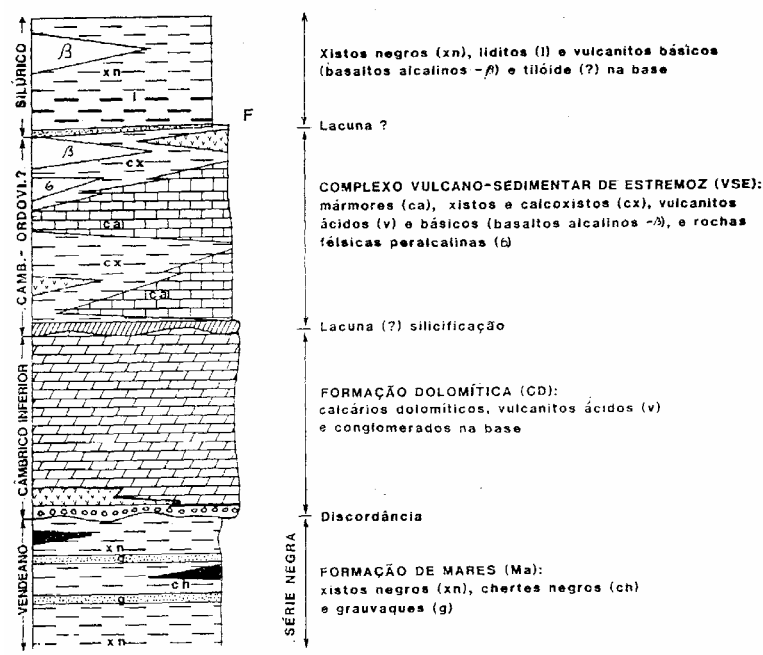



Figura 4.3 – Unidades estratigráficas do Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa.

(fonte: Oliveira *et al.*, 1991)

4.1.2.2. Tectónica

O Anticlinal de Estremoz, e de acordo com Carvalhosa *et al.* (1987) foi afectado por duas fases de dobramentos seguidas de acções de cisalhamento, devido à Orogenia Hercínica. A primeira fase de dobramentos (F1) conduziu a dobras isoclinais apertadas, de plano axial N-S e NNW-SSE, inclinando cerca de 20° para ENE com eixo subhorizontal. Na segunda fase (F2) as dobras resultantes apresentam orientação NW-SE, com inclinação dos planos axiais que podem atingir 70° a 80° para SW (com a atitude média de N30W, 65° SW) e com eixos mergulhantes entre 20° e 40° para SE e NW.

De acordo com Ladeira (1981) e com Reynaud e Vintém (1992), todo o maciço sofreu importantes esforços tectónicos que lhe provocaram, além dos dobramentos e numa terceira fase, intensa compartimentação. Essa compartimentação apresenta como direcções mais importantes as seguintes:

1) *NNE–SSW* – as fracturas NNE–SSW apresentam inclinações dominantemente verticais, estando associadas, em alguns casos, a dolomitização secundária ("olho de mocho").
2) *ENE–WSW* – estas fracturas também subverticais apresentam–se preenchidas, geralmente, por filões doleriticos (conhecidos na região por "cabos reais").
3) *Sub–horizontal* (inclinação máxima de 30°) – fracturas sub-horizontais que podem apresentar inclinações máximas da ordem dos 30° e direcções ENE-WSW ou NNE-SSW.

A fracturação presente em diversas zonas do Anticlinal varia bastante, tal como se pode observar na Figura 4.4 referente ao estudo levado a cabo por Ladeira (1981), embora se note uma certa constância nas famílias de fracturas associadas à estratificação (NW–SE) e à direcção preferencial de instalação de filões (ENE-WSW).

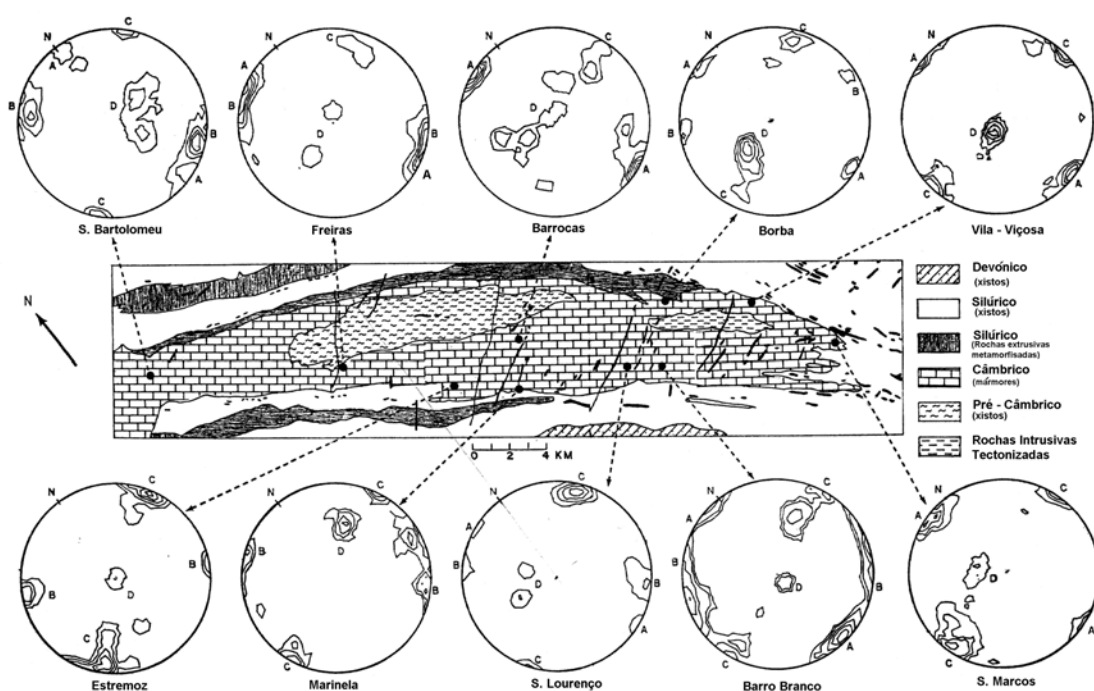



Figura 4.4 – Distribuição da fracturação em várias zonas do Anticlinal.
(adaptado de Ladeira, 1981)

No mármore, a fracturação é influenciada pela homogeneidade. Assim, quanto mais homogéneo e fino for o mármore maiores são as probabilidades de o encontrar mais fracturado. Caso este apresente intercalações de rocha pelítica (intercalações de xisto) e/ou grão médio, menor será a fracturação presente, em virtude destas características lhe permitirem uma maior deformação quando da instalação de tensões, evitando a sua rotura (Lopes, 1995).

4.1.3. PRINCIPAIS NÚCLEOS DE EXPLORAÇÃO

No Anticlinal de Estremoz, o mármore existente apresenta-se intercalado entre os metadolomitos, na base (metadolomias), e os metavulcanitos e xistos negros, no topo, tal como já foi referido. No flanco NE do Anticlinal os mármores apresentam-se pouco dobrados com orientação NW-SE, inclinando 70º a 80ª para NE, possuindo uma espessura de cerca de 150 m (Silva, 1989). No flanco SW, as camadas apresentam-se com orientações e inclinações bastante variáveis, predominando, no entanto, as orientações NW-SE e as inclinações de 35 a 50º para SW. Neste flanco a espessura máxima da camada de mármores apresenta-se bastante variável. Segundo Carvalhosa *et al*. (1987) a sequência estratigráfica da camada de mármores pode ser definida, de acordo com a sua cor e, do topo para a base, do seguinte modo:

1. *Mármores cinzentos*, por vezes escuros (mármore azul e ruivina);
2. *Mármores claros*, cremes e róseos limpos, ou de vergada fina castanha e acinzentada;
3. *Mármores claros com vergada*, róseos e creme com vergada xistenta espessa.

Na Figura 4.5 apresenta-se uma planta do Anticlinal com as zonas onde ocorrem mármores e onde são apresentados os principais núcleos de exploração existentes na região com uma breve síntese de algumas das suas características.

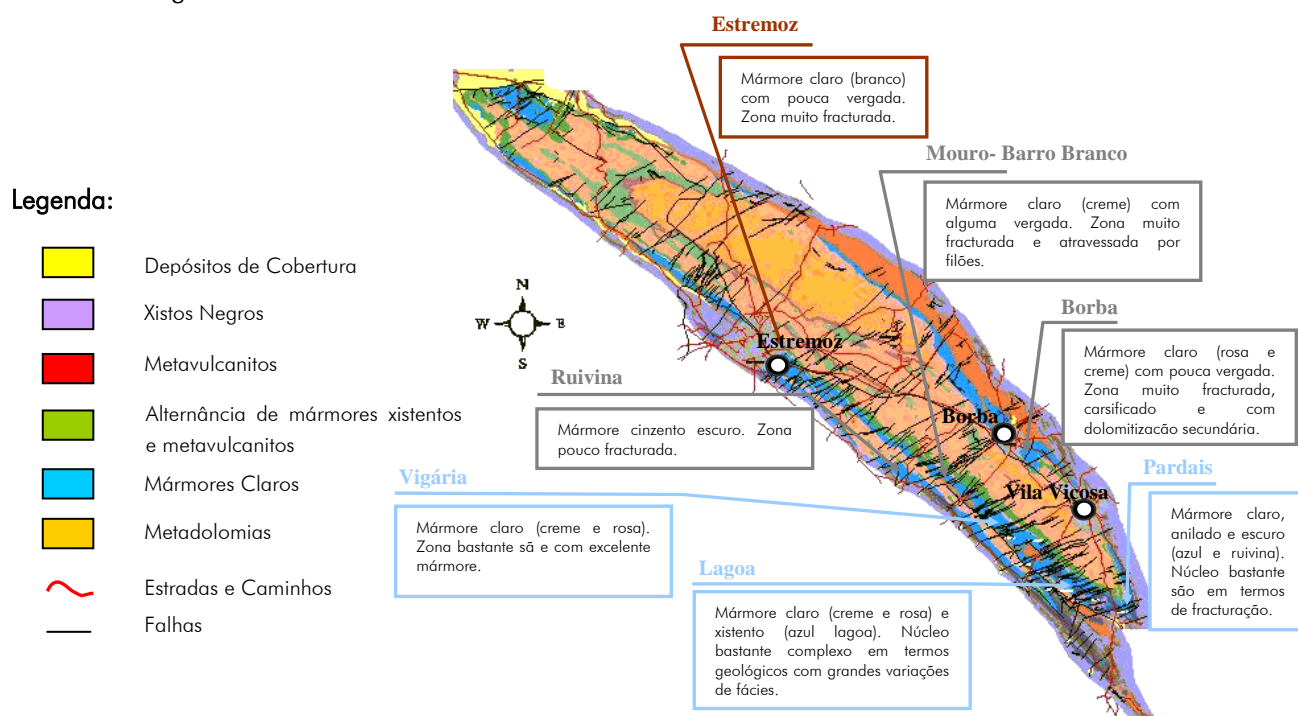
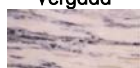
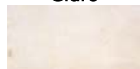



Figura 4.5 – Mapa geológico do Anticlinal com a localização dos principais núcleos de exploração de mármores.
(adaptado de Carta Geológica do Anticlinal à escala 1:25.000 do Instituto Geológico e Mineiro - IGM)

4.1.4. PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS

No que concerne à exploração subterrânea de mármores, revelam-se de extrema importância os dados sobre as propriedades geomecânicas das várias litologias presentes no Anticlinal, uma vez que estas intervêm directamente no dimensionamento dos desmontes, como se terá oportunidade de estudar mais adiante. Assim, e no sentido de caracterizar o Anticlinal sob este aspecto, apresentam-se no Quadro 4.2 os valores dos principais parâmetros intervenientes nesses cálculos para os vários materiais existentes.

Quadro 4.2 – Propriedades geomecânicas das várias litologias presentes no Anticlinal.
(baseado em CEVALOR, 1999)

Litologias	Ensaios										
	Compressão Uniaxial Simples					Tracção (por flexão)		Compressão Triaxial		Deslizamento de Descontinuidades	
	σ_c (MPa)		E (GPa)		ν (ad.)	σ_t (MPa)		c (MPa)	ϕ (º)	c_d (MPa)	ϕ_d (º)
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Média	Desvio padrão	Média	Média	Média	Média
Metavulcanito	12	4	5.3	0.9	0.44	0.73	0.46	3	34	0.96	37
Mármore Azul	64	5.4	59	2	0.38	8	1.5	10	47	0.54	40.1
Mármore Claro com Vergada	65	14	63	7	0.29	6.5	1.2	10.9	46.1	0.28	47.6
Mármore Claro	77	9	65	8	0.21	10.4	1.9	11.6	47.0	1.10	42.8
Dolomito Secundário	72	25.9	65	8	0.27	5.23	2.79	10.8	52	0.65	48.1
Dolomito Primário	78	21.4	79	18	0.31	7.2	3.4	6.5	49	0.77	38.1
Filão Doleritico	59	9	26	2	0.24	9.25	2.31	7	54	0.73	37.8

4.1.5. DADOS ESTATÍSTICOS

No Anticlinal existem cerca de 200 pedreiras em actividade de um total de aproximadamente 370 cortas existentes, segundo Lamberto (1997). Essas unidades extractivas espalham-se pelos vários núcleos de exploração apresentados anteriormente. A maioria das explorações tem uma profundidade entre os 15 e os 50 m, existindo no entanto explorações com profundidades mais elevadas, possuindo a mais profunda cerca de 110 m.

Em termos do rendimento das explorações a céu aberto, este pode variar entre os 5% e os 25%, raramente excedendo esse valor. O número de trabalhadores por exploração deverá rondar em média os 7 a 10 homens e a produção média anual na ordem dos 800 a 1000 m^3.

A exploração de mármores no Anticlinal caracterizou-se por um período de expansão e desenvolvimento durante a década de 1980, tendo mostrado uma estrangulação durante a década de 1990. A comprovar isto estão os valores de produção de mármores à boca da pedreira entre 1976 e 1992 que cresceram linearmente assumindo valores de cerca de 200.000 ton em 1976 e de 640.000 ton em 1992 (Costa *et al.*, 1998). Este estrangulamento, comprovado pelos dados estatísticos da produção de mármore em Portugal que se apresentam no Quadro 4.3, tem impedido o desenvolvimento do sector. Como justificações para a situação no sector, podem apresentar-se as exigências do mercado, as exigências ambientais que só recentemente começaram a trazer constrangimentos às explorações, e factores externos, tais como a Guerra no Golfo (em1991), entre outros.

Quadro 4.3 – Dados estatísticos da exploração de mármores do distrito de Évora.
(baseado em Martins, 1994, 1995 e 1996a)

Ano	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
N.º Pedreiras Activas	249	250	250	249	236	239	228	219
N.º Trabalhadores (operários + encarregados)	2 907	3 020	3 029	2 965	2 755	2 777	2 736	2 718
Produção (mil ton)	543	591	631	643	596	622	625	627
Produção (mil contos)	11 861	14 648	16 618	17 826	17 651	19 087	19 416	20 059
Produção Unitária média (ton)	2 179	2 366	2 523	2 584	2 526	2 602	2 741	2 861
Produtividade (ton/Homem/ano)	187	196	208	217	216	224	228	231
Produção Nacional de Rochas Ornamentais (mil ton)	928	1 062	1 162	1 144	1 047	1 112	1 157	1 197
Produção Nacional de Rochas Ornamentais (mil contos)	16 210	20 432	23 805	24 618	23 986	26 376	27 766	29 454
Peso na Produção Nacional de Rochas Ornamentais (%)	58.5	55.7	54.3	56.2	56.9	55.9	54.0	52.3

4.1.6. PRINCIPAIS CONDICIONALISMOS À EXPLORAÇÃO

A exploração de mármores no Alentejo apresenta alguns problemas relacionados com a complexidade geológica que condiciona, em alguns casos, as explorações, podendo mesmo conduzir ao seu abandono. Estes condicionalismos de origem geológica prendem-se com os seguintes aspectos (Vintém, 1998):

a) Compartimentação por falhas e fracturação

A compartimentação do maciço por falhas ocorre ao longo de toda a estrutura, aparecendo preenchida por filões doleríticos. A sua atitude ronda os N60ºE,

verticais e os N20°E ou N80°W, subordinadas das anteriores que podem ocorrer ocasionalmente.

A fracturação principal que condiciona a obtenção de blocos comercializáveis apresenta-se segundo as famílias constantes do Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Atitude das principais famílias de fracturas presentes no Anticlinal.
(baseado em Reynaud e Vintém, 1992 e 1994)

FAMÍLIAS	DIRECÇÃO	INCLINAÇÃO
NW-SE (associado a falhas de movimento esquerdo)	N5-10°W	45-50° NE
	N5-10°W	70-75° NE
	N30-45°W (*) (longitudinal à estrutura)	*Subvertical*
	N40-45°W	45-50°NE
	N40-45°W	35-45°SW
	N70-75°W	Subvertical
NNE-SSW (associado a fenómenos de dolomitização secundária - "olho de mocho")	*N5-10°E* (*) (diagonal à estrutura)	*Subvertical*
	N40-45°W	Sub vertical
ENE-WSW (normalmente preenchidas por filões)	*N60-75°E* (*) (transversal à estrutura)	*Subvertical*
SUB-HORIZONTAL	*ENE-WSW*	*≤30°*
	NNE-SSW	*≤30°*

(*) - Famílias mais frequentes no Anticlinal.

Segundo Vintém (1998) é observável uma diminuição da fracturação em profundidade, embora esta não se possa considerar geral para todo o maciço, pois varia de local para local.

b) Dolomitização secundária

A dolomitização secundária é responsável pela transformação de mármore num dolomito cavernoso secundário sem aptidão ornamental (vulgo "olho de mocho"). Esta dolomitização poderá ocorrer principalmente em zonas que obedecem às seguintes características (Vintém, 1998):

- Ao longo de planos de estratificação quando ocorrem heterogeneidades nos estratos;
- Segundo bandas de cisalhamento, sensivelmente, N40°W longitudinais à estrutura geral;
- Segundo falhas direitas de orientação N20°E, obliquas em relação à estrutura;
- Segundo a direcção N60°E, paralelamente aos filões doleríticos.

c) Carsificação

O aparecimento do carso nas explorações é relativamente frequente, sobretudo em Borba e em algumas zonas da Lagoa. Esta carsificação ocorre ao longo de planos de estratificação e segundo falhas de direcção N60ºE e N10ºE. Estes fenómenos, de acordo com as sondagens realizadas pelo Instituto Geológico e Mineiro (IGM) podem aparecer até profundidades de 150 m (Vintém, 1998).

Existem ainda outros condicionantes à exploração que foram aparecendo com a evolução da lavra e que resultam do facto de em reduzidas áreas de corta se terem atingido elevadas profundidades, o que tem conduzido à degradação do recurso por concentração de tensões junto dos taludes, acabando por induzir fracturação no mármore. Para resolver tais problemas terá que se adoptar novas soluções, que podem passar pelas seguintes medidas:

- Alargar a área das cortas (através da junção de explorações contíguas) e definir degraus nos taludes;

- Adoptar novos métodos de desmonte (ex. método de exploração subterrânea) para o caso em que o alargamento não seja possível.

4.2. APLICABILIDADE DA EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA NO ANTICLINAL

4.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA

Como se referiu anteriormente (capítulo 3.3) uma exploração subterrânea pode derivar de uma exploração em profundidade ou em flanco de encosta. Outro caso menos viável, actualmente, dados os elevados investimentos que tal exploração necessitava, será o desenvolvimento de uma exploração subterrânea de mármores a grande profundidade a partir de um poço ou rampa. A esta situação não será dada tanta importância neste estudo, uma vez que o estado actual das explorações no Anticlinal, e atendendo à legislação vigente que considera os mármores um recurso do domínio privado, levará naturalmente à expansão das explorações através do método subterrâneo a partir das cortas existentes. Os principais factores que podem estar na base da decisão de expansão das explorações a céu aberto através do desmonte em subterrâneo, dando origem a uma lavra mista, podem ser os seguintes (baseado em Gama, 1995):

- Impedimento de avançar em profundidade por questões de estabilidade, alcance do nível freático, aparecimento de materiais de fraca qualidade, factores económicos, etc.;
- Impossibilidade de avançar a céu aberto devido a severos constrangimentos ambientais;
- Custo dos terrenos elevado e/ou acessibilidade difícil;
- Existência de uma espessura elevada de material de recobrimento sem aptidão ornamental;
- Futura utilização rentável para o espaço subterrâneo criado pela exploração da pedreira.

No caso de uma exploração em flanco de encosta, a qual não pode ser realizada no Anticlinal de Estremoz dada a topografia plana do mesmo, é mais fácil iniciar directamente uma exploração subterrânea, nomeadamente quando a jazida apresenta uma geometria favorável (ex.: presença a tecto e a muro de material sem qualidade ornamental). A escolha deste tipo de exploração, no caso do flanco de encosta, pode também ser motivada por questões ambientais, dado que o desmonte em subterrâneo minimiza os impactes ambientais sobre a paisagem e reduz a produção de escombros.

Com o avanço da tecnologia das rochas ornamentais, que tem conduzido à introdução crescente de meios mecanizados (roçadoras, máquinas de fio diamantado, etc.), assiste-se actualmente a uma maior preservação das características do jazigo mineral durante a sua exploração. Com estes equipamentos, o recurso a explosivos para desmonte de rocha só é realizado em situações muito esporádicas e em trabalhos preparatórios. Assim, a evolução tecnológica é também responsável pela mudança dos métodos de desmonte, permitindo um aumento considerável da produtividade e do rendimento das explorações.

Os principais factores que devem ser estudados para a abertura de uma exploração subterrânea, e que podem determinar a sua viabilidade, são os seguintes:

- Forma da jazida;
- Características geológicas da jazida;
- Fracturação;
- Características estruturais da jazida;
- Características geomecânicas do maciço;
- Estado de tensão *in situ*;
- Dimensões possíveis para as cavidades;
- Recuperação da jazida;
- Rendimento.

Numa exploração subterrânea de rochas ornamentais, e durante a fase de projecto de engenharia, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Método de exploração;
- Equipamento mineiro;
- Acessos;
- Ventilação;
- Iluminação;
- Drenagem;
- Ritmos de produção;
- Rentabilidade económica;
- Uso do espaço subterrâneo.

Atendendo à situação de exploração existente, os acessos aos desmontes subterrâneos que se pretendem iniciar podem ser do seguinte tipo:

- Exploração a céu aberto – utilizados os acessos do céu aberto e acessos específicos à exploração subterrânea, geralmente por túnel.

- Exploração em flanco de encosta – acessos por túnel ou rampa dependente da inclinação do jazigo mineral;
- Exploração subterrânea profunda - acesso por rampa ou poço que conduz até à jazida.

A exploração de rochas ornamentais em subterrâneo, e em especial no caso dos mármores, apresenta algumas especificidades, destacando-se a que se centra no facto de não ser desejável a indução de fracturas no maciço rochoso com a abertura das cavidades de exploração. Este fenómeno, a ocorrer, resultaria numa diminuição da dimensão da blocometria disponível para exploração e, por conseguinte, numa redução do rendimento dos desmontes. Assim, o controlo da estabilidade das cavidades assume-se como um aspecto fundamental, que deve ser salvaguardado, de modo a ser mantida a integridade do jazigo mineral e a potenciar uma futura utilização do espaço subterrâneo criado.

4.2.2. CONDIÇÕES DE APLICABILIDADE NO ANTICLINAL

No Anticlinal de Estremoz – Borba - Vila viçosa, a exploração de mármores foi, até 1997, realizada unicamente a partir de pedreiras a céu aberto, altura em que se inicia a primeira exploração subterrânea a partir de uma delas.

A exploração de rochas ornamentais no Anticlinal começou a enfrentar novos desafios, nomeadamente relacionados com as exigências ambientais e com as políticas de ordenamento, aliadas ao facto das jazidas de boa qualidade aflorantes serem cada vez mais escassas e as que existem encontram-se por baixo de unidades litológicas com pouco ou nenhum valor ornamental, ou de infra-estruturas industriais (instalações, escombreiras, e outros). Assim, e apesar da quase totalidade das pedreiras actuais serem a céu aberto, dadas as características aflorantes da jazida, a partir de agora, pelas condicionantes anteriormente apresentadas, novas soluções têm que ser encontradas para a exploração deste precioso recurso.

Dentro do leque possível, a exploração em subterrâneo assume-se como uma alternativa a considerar, que poderá ser responsável pela viabilização de zonas que de outro modo não seriam possíveis de explorar. É certo que os preços de venda do produto que se praticam actualmente não permitem pensar em realizar a lavra subterrânea em recursos de menor qualidade. A este facto está também associada a elevada fracturação da jazida em algumas zonas, que traria certamente problemas de estabilidade. Mesmo assim, haverá certamente um campo de aplicação vasto para este método de lavra, que possibilitará o incremento de receitas, mesmo a partir da exploração a céu aberto em actividade, permitindo fazer face ao exigente mercado que dificilmente viabilizará o alargamento das explorações com espessuras elevadas de recobrimento (mais de 20 m) de material de fraca qualidade ornamental, como acontece em várias pedreiras da região.

A extrapolação de conhecimentos de outras zonas onde este tipo de lavra é prática comum não pode ser realizada directamente, tal como já foi aflorado anteriormente, atendendo às especificidades do Anticlinal, tais como:

- Relevo plano que não permite realizar explorações em flanco de encosta (como em Carrara, Itália);

- Existência de fenómenos geológicos complexos que motivaram dobras e cisalhamentos e intercalações de filões, originando uma heterogeneidade marcante ao nível das litologias e consequentemente das características geomecânicas do maciço, diferindo bastante da estrutura geológica regular da pedreira de Danby (Vermont – E.U.A);
- Presença de tensões acumuladas em dobras que podem conduzir a elevados graus de fracturação quando desconfinadas pelas cavidades das explorações, o que dificulta também as operações de corte e obviamente a obtenção de rendimentos variáveis em bloco.

Devido às razões anteriormente mencionadas, e à falta de conhecimento e experiência acumulada, dado o estado inicial da lavra subterrânea no Anticlinal, os projectos de engenharia para explorações subterrâneas de mármore devem atender a estas situações, com vista a evitar o descrédito deste novo método. No caso do Anticlinal, as situações que poderiam justificar o início da exploração em subterrâneo, prendem-se fundamentalmente com os seguintes aspectos:

- Existência de zonas com material de excelente qualidade sob elevadas coberturas de material estéril (solos e mármore de fraca aptidão ornamental);
- Áreas licenciadas de reduzidas dimensões o que inviabiliza o alargamento da pedreira e a remoção das camadas superficiais sem interesse comercial;
- Alguma pressão ambiental relativamente aos impactes na paisagem, causados pelas cortas e principalmente pelas escombreiras.

Na Figura 4.6 apresentam-se, a título ilustrativo, alguns potenciais casos em que a lavra subterrânea poderia ser utilizada com sucesso no Anticlinal.

A. Exploração profunda

B. Exploração superficial

C. Exploração por baixo das instalações de apoio

D. Exploração por baixo de uma escombreira

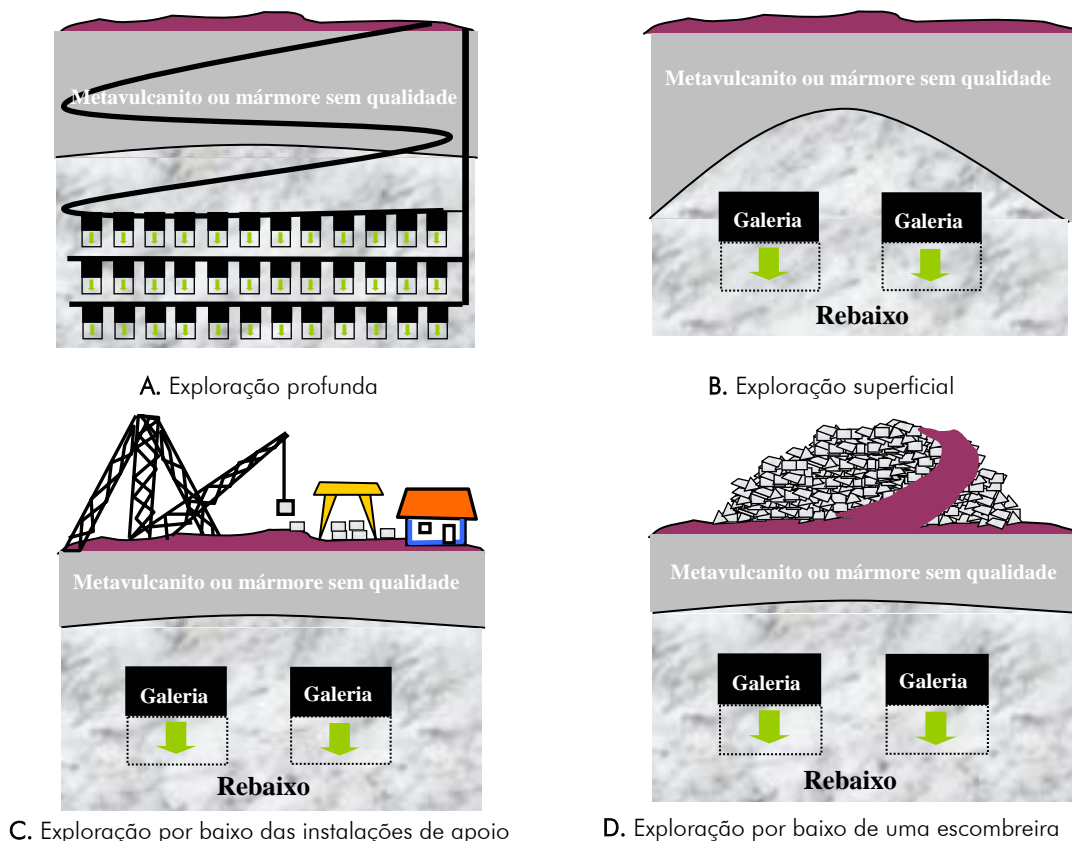



Figura 4.6 – Exemplos de situações onde se poderia recorrer à exploração subterrânea.

A aplicação da lavra subterrânea ao Anticlinal carece de estudos preliminares que devem ser efectuados visando o bom aproveitamento da jazida, a garantia de viabilidade da exploração e a presença de estabilidade durante o seu avanço, quer se parta de uma exploração a céu aberto, que constituirá o caso mais frequente, quer se estude a exploração do mármore profundo.

4.2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS

A lavra subterrânea apresenta algumas vantagens relativamente ao desmonte a céu aberto. No Quadro 4.5, que se apresenta de seguida, estão sintetizadas as principais diferenças entre ambos os métodos.

Quadro 4.5 – Comparação entre os desmontes em subterrâneo e a céu aberto.

SUBTERRÂNEO	CÉU ABERTO
Trabalha-se mesmo em condições atmosféricas adversas.	Más condições de trabalho em situações climatéricas adversas.
Movimentação mais difícil dos detritos e dos blocos. Espaço de trabalho mais reduzido.	Mais espaço para trabalhar e para a movimentação de equipamentos.
Permite a exploração directa de blocos esquadrejados prontos a expedir para a transformação.	Geralmente os blocos que resultam do desmonte são irregulares e tem que sofrer esquadrejamento antes de saírem da pedreira.
Necessita de iluminação e ventilação (em grande parte dos casos).	Em condições de trabalho diurnas não necessita de iluminação. Não necessita de ventilação.
Evita a remoção de partes superficiais da jazida sem interesse ornamental.	É necessário explorar as zonas superficiais do maciço com fraca aptidão ornamental.
Necessita de elementos de suporte.	Não necessita de elementos de sustimento, na maior parte dos casos.
Menores impactes ambientais e menor produção de escombros.	Maiores impactes ambientais (paisagem, ruído, flora, fauna, etc.) e maior produção de escombros.

Para além das características enumeradas anteriormente a lavra subterrânea de mármores possui ainda várias vantagens e desvantagens que se passam a enumerar:

1. Vantagens

a) Aproveitamento de meios das explorações a céu aberto (equipamento, acesso ao jazigo mineral, etc.). Os equipamentos a utilizar em subterrâneo são os mesmos do céu aberto, com excepção da máquina de abertura de galerias (roçadora). Este facto traz algumas vantagens, nomeadamente:

- Trabalhos similares no céu aberto e no subterrâneo;
- Maior experiência na operação e manutenção dos equipamentos;
- Maior rentabilização dos equipamentos utilizados;
- Maior capacidade de produção por unidade de capital investido.

b) Lavra selectiva possibilitando explorar as zonas de melhor material e deixar para suporte natural (pilares esteios) as zonas em que o material se apresente com pouca

ou sem aptidão ornamental, o que origina um maior rendimento e uma menor produção de escombros;

c) Não se altera a paisagem nem a fisiografia do terreno em torno das cavidades;

d) O ruído originado pelas actividades de desmonte de rocha são atenuados para o exterior;

e) Não são necessários trabalhos de reabilitação dos terrenos superficiais na zona de subterrâneo;

f) Recuperação de material de qualidade que de outro modo não seria explorado com viabilidade económica.

2. Desvantagens

a) Custos elevados e investimento considerável, no piso de entrada em subterrâneo;

b) Constrangimentos geométricos nos desmontes devido à necessidade de manter a estabilidade;

c) Necessidade de um conhecimento pormenorizado das características geológico-geotécnicas do jazigo mineral;

d) Necessidade de ventilação e iluminação artificiais (em alguns casos).

Após três anos de experiência ao nível da exploração subterrânea de mármores no Anticlinal e de acordo com Gomes (1999), foi detectado que este método não será por certo o método de desmonte por excelência de exploração de mármores no Anticlinal, pelo menos no presente, dado o relevo plano do Anticlinal e a morfologia do jazigo. Apesar disso, constitui uma excelente alternativa em determinadas situações ocorrentes em algumas pedreiras da região, em que a jazida marmórea apresenta condições favoráveis a este tipo de lavra, semelhantes às apresentadas no capítulo anterior.

4.2.4. ASPECTOS ECONÓMICOS

A exploração em subterrâneo necessita de alguns investimentos, que podem passar a elevados no caso de se estar a abrir uma nova exploração, ou seja, sem partir de uma já existente a céu aberto (Fornaro e Bosticco, 1995b). O investimento a realizar está relacionado, essencialmente, com os seguintes aspectos:

- Estudos de prospecção e caracterização do jazigo mineral;
- Estudos técnicos e económicos;
- Aquisição de alguns equipamentos (essencialmente a roçadora de galeria).

Caso a exploração subterrânea parta de uma corta a céu aberto, poderá ser utilizada a informação geológica e geotécnica existente, pelo que os custos com estes estudos serão inferiores.

O mesmo se passa ao nível dos equipamentos, dado que os meios tecnológicos para exploração subterrânea são os mesmos do céu aberto, com excepção da roçadora para galeria, que terá que ser adquirida ou alugada.

Em termos da lavra, propriamente dita, existem alguns custos característicos do desmonte a céu aberto que não se verificam em subterrâneo, tais como custos de decapagem, de movimentação e deposição de escombros, e gastos com a recuperação paisagística. Apesar disso, existem outros custos que são, especialmente, característicos do subterrâneo, tais como os custos de ventilação, iluminação, estabilização e monitorização dos maciço.

A adopção de uma lavra mista traduzir-se-á numa maior longevidade das explorações, com aspectos positivos ao nível da gestão da exploração, embora exija maiores investimentos e custos operacionais, que serão compensados por maiores receitas, tal como se pode observar na Figura 4.7.

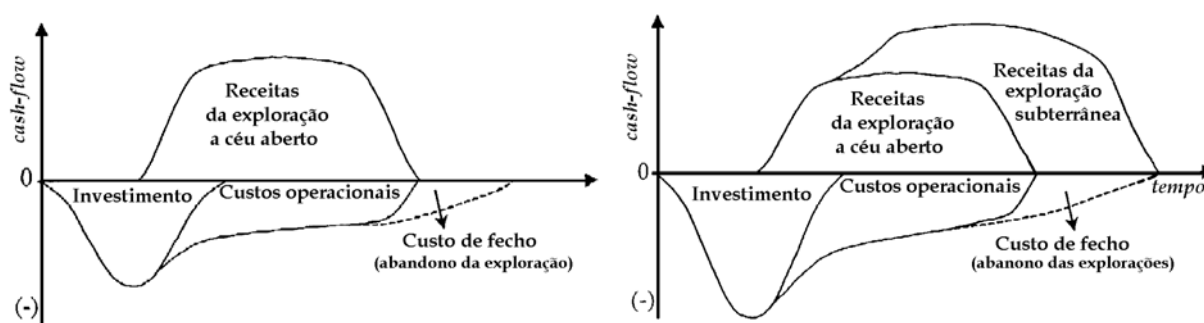



Figura 4.7 – Perfis típicos de *cash-flows* em pedreiras.
(adaptado de Jimeno, 1995)

De modo a optimizar economicamente o método de desmonte, este deve ser estudado do ponto de vista dos seguintes factores:

- Tempo de corte (minimizar) - função do equipamento e do tipo de sequência de corte a realizar;
- Volume a desmontar (maximizar) - dimensão da galeria, estabilidade do maciço, qualidade da rocha;
- Custos de desmonte (minimizar) - uso de máquina de fio diamantado em certos cortes.

Comparativamente com os custos do céu aberto, a lavra subterrânea incrementará estes custos no caso de passagem a lavra mista, nos seguintes pontos:

- Mão de Obra

  Necessário um operador para a roçadora e um ajudante.

- Energia

  Consumo de energia por parte da roçadora e de gasóleo por parte da máquina que auxiliar a roçadora, no transporte, derrube e remoção do mármore.

- Fio Diamantado e outras Ferramentas de Corte

  Maior consumo de fio diamantado devido aos cortes posteriores da talhada em subterrâneo. Custos adicionais na aquisição das ferramentas cortantes que equipam a roçadora.

- Equipamento

  Aquisição ou aluguer da roçadora para a lavra subterrânea.

- Outros

  Manutenção da roçadora e acréscimo nos custos de manutenção dos outros equipamentos utilizados na exploração a céu aberto e na exploração subterrânea em simultâneo. Aquisição de ferramentas específicas para o subterrâneo (poleias, colchões hidráulicos, etc.).

Para abrir uma exploração subterrânea deve ser efectuado um estudo de pré-viabilidade que deverá englobar a análise de um conjunto de parâmetros, tais como: condições geomorfológicas, unidades litológicas, padrão de fracturação, estrutura geológica do jazigo mineral, condições logísticas, valor no mercado dos produtos extraídos, entre outros. A realização de um estudo de pré-viabilidade de exploração pode ser uma ferramenta adequada para avaliar a situação do jazigo mineral e prever a sua viabilidade económica. Este estudo deve englobar os aspectos apresentados no Anexo II.

Caso o estudo de pré–viabilidade produza resultados interessantes, pode-se avançar para o estudo de viabilidade, o qual segue as linhas deste, embora englobando um conjunto de dados mais precisos baseados em estudos de pormenor do maciço marmóreo, em superfície e em profundidade, devendo este seguir as fases apresentadas no capítulo 5.1.

4.2.5. APROVEITAMENTO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO

O aproveitamento do espaço subterrâneo deixado pela actividade extractiva tem cada vez mais procura para diversas actividades, tais como:

- Armazenamento de combustíveis líquidos;
- Armazenamento de alimentos e produtos agrícolas;
- Tratamento de águas residuais;
- Armazenamento de produtos radioactivos;
- Centrais de ar comprimido;
- Cofres;
- Deposição de resíduos;
- Arquivo de documentos;
- Entre outros.

Segundo Jimeno (1995) a ideia de utilizar os espaços subterrâneos deixados pela actividade extractiva não é nova. Já nos anos 1960 nos Estados Unidos (Kansas City) se pensava nestes aspectos, no entanto os métodos de exploração que eram utilizados não permitiam o uso desse espaço por questões de estabilidade. Assim, a partir desta data, foram tomadas algumas medidas em termos do espaçamento regular dos pilares e do garante da estabilidade das explorações. Esta ideia tem sido aproveitada por outros países, nomeadamente pela Áustria, Inglaterra, Japão, Finlândia e Noruega, os quais têm vindo a utilizar as cavidades para os fins anteriormente apresentados.

As vantagens dos espaços subterrâneos criados pela indústria extractiva são as seguintes (adaptado de Jimeno, 1995):

- Temperatura praticamente constante ao longo de todo o ano, o que reduz os custos com a climatização do espaço;
- Humidade facilmente controlada;
- Menores riscos de contaminação radiológica e proliferação de insectos;
- Menores custos de construção;
- Diminuição da taxa de ocupação dos terrenos à superfície;
- Custos de manutenção menores do que à superfície.

As cavidades subterrâneas apresentam benefícios económicos, caso possam ser utilizadas após a exploração do recurso, o que no caso do Alentejo poderá ser equacionado, nomeadamente ao nível de:

- Armazenamento de líquidos (vinhos);
- Armazenamento de alimentos (queijos);
- Armazenamento de materiais;
- Deposição de resíduos.

Para tal, é necessário garantir a estabilidade das cavidades durante e após a sua exploração. Uma vez que os métodos utilizados no desmonte não são destrutivos e que as paredes e pisos ficam regulares, a reutilização do espaço não seria difícil. Apesar disso, essa possibilidade para as cavidades marmóreas deverá ser alvo de estudo específico, tendo em conta a sua finalidade e as condições que apresentam, sem esquecer a situação do jazigo marmóreo relativamente a futuros trabalhos de desmonte.

4.2.6. LICENCIAMENTO

Para abrir uma pedreira, quer seja a céu aberto, quer seja em subterrâneo, um dos projectos que é necessário apresentar à entidade licenciadora, de acordo com a legislação Portuguesa, é denominado de Plano de Lavra. Este projecto de engenharia consiste na descrição dos resultados dos trabalhos de prospecção e sua integração na programação detalhada dos trabalhos de exploração, dando as orientações para os trabalhos de extracção e a previsão da evolução espaço-temporal dos mesmos (faseamento da lavra). Trata-se de um instrumento muito importante, quer do ponto de vista técnico, quer económico, pois permite prever o trabalho a médio prazo. A importância do Plano de Lavra, que não passava de uma formalidade legal, tem vindo a mostrar-

se cada vez mais útil graças, talvez, ao melhoramento das técnicas de recolha de informação, à formação especializada das pessoas que elaboram esses planos, e a uma maior exigência por parte da entidade licenciadora.

No projecto de engenharia para abertura de uma exploração subterrânea, qualquer que seja, e segundo Gama (1995), existe um conjunto de factores que devem ser tomados em consideração, dada a influência que têm sobre o resultado final do mesmo. Esses factores são os seguintes:

- As propriedades mecânicas das rochas envolvidas;
- Estudo da tensão preexistente (peso dos terrenos, acções tectónicas, etc.);
- Geometria das escavações (deve estar de acordo com a tensão preexistente);
- Velocidade de avanço das escavações e técnicas de abertura;
- Tempo entre o desmonte e a instalação dos suportes;
- Adequação de sistemas escolhidos para o suporte dos tectos;
- Controlo de estabilidade por observação e por instrumentação;
- Duração e função das cavidades.

Atendendo aos aspectos anteriormente focados deve ser elaborado o Plano de Lavra em concordância com a legislação vigente, o qual deverá considerar os aspectos apresentados no Anexo III.

Para além do Plano de Lavra, há necessidade de realizar estudos durante o ciclo de vida da pedreira, com vista à reformulação deste documento, incorporando novas informações que vão sendo recolhidas durante os trabalhos de desmonte. No quadro seguinte são apresentadas as acções que devem ser levadas a cabo nos vários estudos, quer para a abertura, quer durante a vida da exploração subterrânea de mármores.

Quadro 4.6 – Estudos a elaborar para a abertura e durante a exploração de uma pedreira.

FASES DE ESTUDO DE UMA PEDREIRA					
Pré-Viabilidade	Viabilidade	Plano de Lavra	Abertura da exploração	Exploração	Abandono
Recolha bibliográfica Prospecção de superfície (geológica e geomecânica) Prospecção expedita à superfície (sanjas, valas, etc.)	Prospecção de superfície (cont.) Prospecção em profundidade (geofísica e sondagens) Ensaios in situ Ensaios Laboratoriais Zonamento ornamental - geotécnico	Completar prospecção geológica e geomecânica Dimensionamento dos desmontes Faseamento da lavra	Prospecção durante os avanços, nas frentes da exploração Análise do comportamento das cavidades	Prospecção durante o avanço Monitorização Estabilização Optimização dos desmontes	Estudo da utilização a dar à cavidade Estabilização da cavidade Recuperação paisagística da zona envolvente

5. GEOMECÂNICA APLICADA À EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES

5.1. PROGRAMA GLOBAL DE ACTIVIDADES

Até há bem pouco tempo a abertura de uma pedreira baseava-se, essencialmente, em conhecimentos empíricos dos locais em análise, não sendo frequente a realização de quaisquer estudos geológicos e de avaliação de reservas. Para iniciar a exploração realizavam-se apenas sanjas e destapagens que, eventualmente, permitiam averiguar sobre a qualidade do mármore existente à superfície. Ora este método enferma de problemas, pelo facto de não permitir estudar a continuidade da jazida em profundidade do ponto de vista da qualidade da rocha e da sua fracturação. Por este motivo, muitas pedreiras foram abandonadas numa fase inicial de exploração sem que o material extraído cobrisse os custos e investimentos realizados.

Actualmente assiste-se a uma mudança de atitude no que respeita ao recurso à geologia e à geomecânica, motivada essencialmente pela aprendizagem com os erros do passado. A descoberta por parte da indústria das rochas ornamentais de novos métodos de prospecção aplicáveis aos mármores, como são as sondagens e os métodos geofísicos, bem como o aparecimento no Anticlinal de um maior número de técnicos qualificados que se posicionaram ao lado dos empresários, têm contribuído para um maior apoio nas decisões. Esta mudança de atitude é evidenciada pela maior frequência com que se realizam levantamentos geológicos de superfície e sondagens, com vista ao auxílio na determinação das reservas disponíveis e na tomada de decisões sobre a abertura de uma exploração. Esta prática também se começa a verificar nas pedreiras em exploração, quando se pretende alargar ou aprofundar a corta ou quando aparecem alterações inesperadas nas características da rocha. Apesar disso, o recurso aos estudos de geologia e de engenharia ainda se apresentam aquém do que seria necessário, sendo realizados, na maior parte dos casos, por um conjunto restrito de empresas, e apenas quando aparece uma situação anormal. As situações que mais frequentemente dão origem a estudos de geologia e de engenharia no Anticlinal de Estremoz, são os seguintes:

- Instabilidade de taludes;
- Aparecimento de fenómenos geológicos que dificultam a lavra (dolomito secundário, intercalações xistentas, etc.);
- Intensificação súbita da fracturação.

Os estudos referidos permitem às empresas melhorar a gestão da exploração, quer em termos das opções de lavra, em função das reservas por tipo de material, quer em termos do investimento a realizar, entre outros.

Apesar da importância dos estudos geológico-geotécnicos, desiludam-se os que pensam que a realização destes lhes dá o conhecimento preciso do jazigo mineral, pois isso só em casos muito

especiais de maciços marmóreos contínuos e homogéneos poderá acontecer (como é o caso da pedreira subterrânea de Danby nos E.U.A.) e mesmo nestes existe sempre alguma incerteza associada. No Anticlinal de Estremoz, estes estudos são obviamente mais complicados, dada a complexidade geológica da zona, pelo que o grau de certeza e de definição da jazida depende, essencialmente, das características geológicas do local em estudo, da quantidade de informação disponível e dos meios a utilizar nessa análise (técnicas de análise, número de sondagens, direcções, profundidades, etc.).

O programa de prospecção a adoptar para o estudo de um terreno ou de uma pedreira em exploração, depende do seu objectivo. No caso da prospecção se realizar num terreno virgem, o objectivo será o conhecimento do jazigo mineral existente, com vista à abertura de uma pedreira. Para o caso de uma pedreira em exploração, os objectivos da prospecção podem ser variados: alargar, aprofundar, melhorar, seleccionar materiais, etc.

No estudo de um maciço marmóreo com vista à abertura de uma exploração subterrânea, deve ser seguido um programa de actividades que, apesar de se basear nos mesmos métodos de estudo de uma pedreira a céu aberto apresenta, no entanto, algumas particularidades, das quais se destaca a necessidade de garantir a estabilidade das cavidades de desmonte. O programa global desse estudo, que faz parte da metodologia para a abertura de uma exploração subterrânea de mármores, envolve várias fases, as quais se apresentam no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Fases do estudo global para a abertura de uma exploração subterrânea de mármores.

FASES	ETAPAS	OBJECTIVOS	TOMADAS DE DECISÃO (DURANTE OU NO FIM DA ETAPA)
FASE 1	*1.1. Prospecção Geológica*	Definição do modelo geoestrutural do jazigo marmóreo, identificando e caracterizando as zonas com potencial ornamental.	1ª - Análise da pré-viabilidade económica da exploração atendendo à quantidade, qualidade e morfologia do material disponível para exploração.
	1.2.Caracterização Geomecânica	Definição do modelo geomecânico do maciço marmóreo, caracterizando-o do ponto de vista da sua resistência e deformabilidade e critério de rotura.	2ª - Análise da viabilidade do jazigo mineral confrontando as características ornamentais com as geotécnicas.
FASE 2	*2.1.Método de Desmonte*	Definição do método de desmonte a utilizar, bem como da geometria das cavidades e do faseamento da lavra.	3º - Estudo dos custos inerentes ao método de desmonte e ao ciclo produtivo adequados ao caso em estudo, através de uma análise custo-benefício.
	2.2. Ciclo Produtivo	Definição das operações unitárias e auxiliares, bem como do equipamento e pessoal necessário.	
FASE 3	*3.1. Instrumentação dos Desmontes*	Definição do plano de instrumentação adequado para um correcto acompanhamento do comportamento do maciço durante a lavra.	4º - Análise dos custos associados à instrumentação e ao suporte artificial previsto, os quais podem inviabilizar a exploração.
	3.2.Estabilização dos Desmontes	Definição dos métodos de suporte a utilizar para salvaguardar situações de rotura e de deformação, atendendo ao método de desmonte praticado.	

Atendendo ao exposto no quadro anterior é possível verificar que devem ser feitas algumas reflexões durante o estudo, à medida que se vão recolhendo informações, com vista à tomada de decisão sobre a continuação ou a paragem dos trabalhos de prospecção.

A fase 1 do referido programa, que será objecto de estudo ao longo do capítulo 5, compreende as actividades apresentadas no fluxograma da Figura 5.1.

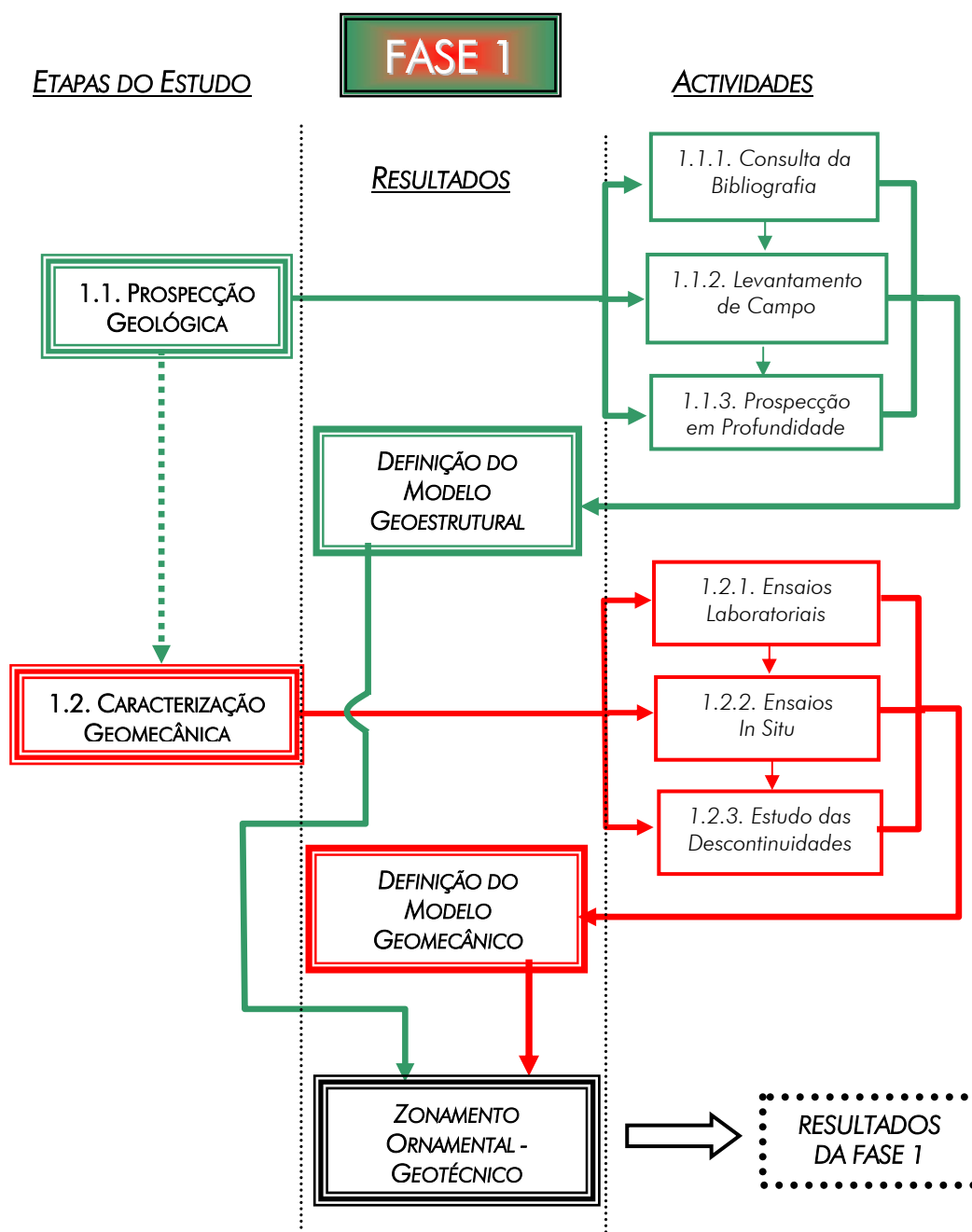



Figura 5.1 – Fluxograma da fase 1 (prospecção geológica e caracterização geomecânica) do estudo para abertura de uma exploração subterrânea de mármores.

5.2. PROSPECÇÃO GEOLÓGICA

A prospecção geológica tem como principal objectivo a definição do modelo geoestrutural do jazigo marmóreo, com vista à identificação e caracterização das zonas com potencial ornamental. Esta etapa da metodologia proposta engloba três actividades que serão descritas nos capítulos seguintes.

5.2.1. CONSULTA DA BIBLIOGRAFIA

A consulta da bibliografia disponível sobre a zona em análise e explorações similares constitui o primeiro passo a realizar e tem como objectivo o reconhecimento preliminar do local. A recolha bibliográfica deve recorrer a determinados meios e produzir resultados, tal como se mostra no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Acções a desenvolver e resultados a obter com o estudo da bibliografia.

ETAPA 1.1 - PROSPECÇÃO GEOLÓGICA		
ACTIVIDADE	*ACÇÕES/MEIOS*	*RESULTADOS*
1.1.1. Consulta da Bibliografia	Publicações de seminários e congressos Livros e revistas da especialidade Cartas geológicas Universidades Notícias explicativas das cartas geológicas Fotografias aéreas Consultas pessoais	Geologia regional Informações gerais sobre a geologia local Cartografia (1:50.000 a 1:10.000) Geomorfologia Tectónica Estratigrafia Fracturação Litologias Hidrogeologia Outras informações

Nesta fase deve tentar-se coligir a maior quantidade de bibliografia sobre a zona em estudo, de modo a poupar tempo e dinheiro na obtenção de informação já existente. A consulta da carta geológica do IGM (Instituto Geológico e Mineiro) à escala 1:50 000 e da respectiva noticia explicativa, bem como possíveis cartas geológicas a escalas maiores, são de extrema importância e fornecem dados variados, tais como estratigrafia, tectónica, história geológica, petrologia, hidrogeologia, entre outros. Devem também ser consultados os mapas geotécnicos, hidrogeológicos e de ordenamento do território, caso se encontrem disponíveis.

O recurso à fotografia aérea pode também ser útil para se observarem acidentes tectónicos (falhas, outras descontinuidades), estratigráficos (atitude das camadas) e geomorfológicos (topografia, drenagem superficial) que são facilmente evidenciados no estudo estereográfico das mesmas.

Neste estágio da caracterização da jazida é o estudo da geologia regional que deve constituir o objectivo central. As condições estruturais que ocorrem num determinado local são o produto da

história geológica da região onde está inserido. Assim, através do conhecimento geológico global da região, é possível obter informações preciosas para o estudo local e, consequentemente, para as actividades subsequentes da caracterização geológica do jazigo mineral.

5.2.2. LEVANTAMENTO DE CAMPO

Depois da análise da geologia regional através da bibliografia, o estudo deverá avançar para uma caracterização mais detalhada das condições específicas do local interessado na abertura da exploração, com vista à sua avaliação e integração no projecto de engenharia. Nesta actividade deverão ser realizadas as acções que constam do Quadro 5.3 e obtidos os resultados nele apresentados.

Quadro 5.3 – Acções a desenvolver e resultados a obter com o levantamento de campo.

ETAPA 1.1 - PROSPECÇÃO GEOLÓGICA		
ACTIVIDADE	ACÇÕES/MEIOS	RESULTADOS A OBTER
1.1.2. Levantamento de Campo	Levantamento da estrutura geológica Levantamento da fracturação Estudo das litologias presentes Elaboração de cartografia de pormenor	Informações sobre a geologia local (Superfície) Cartografia (1:1000 ou 1:500) Avaliação preliminar da aptidão ornamental das litologias Avaliação preliminar da blocometria Interpretação preliminar da estrutura

De acordo com o quadro anterior, as principais tarefas a realizar durante o levantamento de campo destinam-se à identificação das litologias presentes nos afloramentos e na pedreira a céu aberto (caso exista), ao levantamento de descontinuidades e de outros acidentes tectónicos (determinação das principais famílias de fracturas, orientação de falhas e de filões, etc.), e à realização de cartografia de detalhe (à escala 1:1000 ou 1:500). Estes levantamentos devem ser realizados por técnicos qualificados.

Na maioria dos casos não é possível obter informações suficientes que permitam concluir sobre a viabilidade da jazida, apenas com o levantamento de campo. Apesar disso, o estudo preliminar possibilita-nos planear as etapas futuras da caracterização da massa mineral (ex.: locais onde realizar sondagens, atitude dos furos, comprimentos adequados, etc.), identificando as zonas onde existem maiores lacunas de informação.

5.2.2.1. ESTUDO DAS LITOLOGIAS

No levantamento de campo, o estudo das litologias presentes é uma das principais tarefas a realizar. A qualidade ornamental do mármore, e tal como foi apresentado no capítulo 3.2.1, depende, essencialmente, de três aspectos: a cor, a textura e a granulometria. Para analisar estes factores é necessário estudar as litologias presentes na área em estudo.

O estudo das litologias é realizado por observação visual e por vezes com recurso a lupa. Quando existem pedreiras abertas próximas da área a estudar, a situação fica facilitada, sendo a análise realizada sobre as frentes de desmonte existentes. Caso contrário, ter-se-à que pesquisar os afloramentos do jazigo marmóreo e estudar as "cabeças" mediante a fragmentação das mesmas com auxílio de martelo. Quando não existem afloramentos devem ser realizadas sanjas, valas ou destapagens, que ponham em evidência a jazida ou então adoptar métodos de prospecção em profundidade.

Durante a observação das frentes e dos afloramentos devem ser estudadas as várias litologias presentes e registada a sua atitude e possança.

No Quadro 5.4 sintetizam-se os principais dados a retirar do estudo das litologias do Anticlinal de Estremoz com vista à avaliação da qualidade do jazigo em termos de exploração.

Quadro 5.4 – Informações a recolher nas litologias do Anticlinal de Estremoz.

<table>
<tr><th>TIPO DE MATERIAL</th><th>LITOLOGIAS</th><th>INFORMAÇÕES A RECOLHER</th></tr>
<tr><td rowspan="5">Sem Aptidão Ornamental</td><td>Metavulcanito/Xisto
(ocorre geralmente à superfície)</td><td rowspan="2">Atitude da camada (direcção e inclinação)
Possança
Continuidade
Comportamento estrutural (possibilidade de dobras ou outros fenómenos)
Estudo de fenómenos de alteração</td></tr>
<tr><td>Mármore Brechóide
(ocorre entre o mármore e o metavulcanito)</td></tr>
<tr><td>Mármore Dolomitizado e Dolomito Secundário
(ocorre formando "bolas" no meio do mármore claro)</td><td>Dimensão da área dolomitizada
Orientação do fenómeno
Continuidade</td></tr>
<tr><td>Dolomito Primário
(limita a base do mármore)</td><td>Atitude da camada (direcção e inclinação)</td></tr>
<tr><td>Filões (doleriticos)</td><td>Atitude
Espessura
Grau de alteração
Continuidade</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Com Aptidão Ornamental</td><td>Mármore escuro</td><td rowspan="3">Cor (branco, creme, rosa, azul, etc.)
Textura (presença de vergada, tipo e dimensão)
Dimensão do grão
Intercalações penalizantes (calcite, quartzo, etc.)
Atitude da camada
Possança
Continuidade
Fracturação
Comportamento estrutural (possibilidade de dobras ou outros fenómenos)
Estudo de fenómenos de alteração</td></tr>
<tr><td>Mármore Claro com Vergada</td></tr>
<tr><td>Mármore Claro sem Vergada</td></tr>
</table>

Toda a informação litológica deverá ser utilizada para elaborar a cartografia preliminar da área em estudo.

5.2.2.2. ESTUDO DA FRACTURAÇÃO/BLOCOMETRIA

O estudo da fracturação pode ter dois objectivos distintos quando aplicado a pedreiras, ou seja:

1. Análise da blocometria (com fins económicos) – Interessa fundamentalmente estudar as características das descontinuidades como a orientação, o espaçamento e a continuidade.
2. Análise geomecânica (estudo da estabilidade) - Interessa estudar todas as características das descontinuidades, nomeadamente a orientação, o espaçamento, a continuidade, o preenchimento, a percolação, a abertura e a rugosidade.

O estudo da fracturação, em termos da estabilidade geomecânica do maciço, será apresentado no capítulo 5.3.3. Nesta fase da metodologia (Levantamento de Campo), a fracturação deverá ser estudada do ponto de vista da blocometria, ou seja, como fenómeno penalizante do mármore enquanto rocha ornamental. O levantamento a efectuar deverá considerar, se possível, os dois objectivos anteriormente indicados, recolhendo informação da orientação, espaçamento e continuidade das fracturas, e se possível, também do preenchimento, condições de percolação, abertura e rugosidade.

Para a realização de um estudo de fracturação, interessa analisar, basicamente, as falhas e as diaclases existentes no maciço rochoso envolvido na exploração de mármore (Costa, 1992). Relativamente às diaclases, estas podem ser de dois tipos:

Naturais – resultam de fenómenos geológicos (tectónicos e outros);

Induzidas – resultam de uma solicitação mecânica não natural (ex.: fenómenos de "relaxamento dilatante" em pedreiras profundas (Attewell e Farmer, 1979), uso de explosivos, libertação de tensões acumuladas em dobras, etc.).

No que diz respeito ao fenómeno de "relaxamento dilatante", este é frequente no Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa, sendo caracterizado pelo "estalar" dos blocos depois de desmontados, graças a efeitos de libertação de tensões de compressão a que se encontravam submetidos. Este fenómenos regista-se sobretudo em pedreiras profundas (geralmente, com mais de 50 m de profundidade) e em blocos desmontados junto de taludes.

A importância do estudo das diaclases deve-se ao facto destas contribuírem para a diminuição do rendimento da exploração, por influenciarem a dimensão do bloco a desmontar e pelo facto de condicionarem o comportamento geomecânico do maciço rochoso. Para analisar a fracturação deve ser utilizada a metodologia proposta pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - ISRM (Miranda, 1991). Para tal é necessário fazer o levantamento das fracturas existentes e conhecer as suas características físicas, ou seja:

- Orientação ou atitude – definida pela direcção e inclinação dos planos de fractura (ex.: N30°W, 30°SW ou N150°, 30°SW), podendo também ser

identificada pela direcção da linha de maior declive em relação ao Norte (ou azimute) e pela inclinação da mesma (ex.: N240°,30° ou N240,30).

- Espaçamento – distância, na perpendicular, entre duas fracturas contíguas (permite caracterizar a densidade da fracturação de uma frente e/ou do maciço).
- Continuidade – extensão da área de influência de uma descontinuidade em determinado volume de rocha.
- Rugosidade – irregularidades ou ondulações na superfície da fractura.
- Abertura – distância na perpendicular entre duas paredes de rocha adjacente.
- Preenchimento – material que ocupa o espaço entre as duas paredes de rocha adjacente.
- Percolação – condições da fractura relativamente à presença de água.

Conforme referido anteriormente, para estudar a blocometria disponível na pedreira, deve ser realizado um levantamento exaustivo da orientação, espaçamento, e continuidade das fracturas. Para estudar a *orientação* das descontinuidades pode-se actuar de duas formas:

a) Medição directa sobre o plano de fractura, tal como se mostra na Figura 5.2.

b) Medição indirecta através da medição da inclinação aparente em duas superfícies de atitude conhecida, aproximadamente normais entre si (Bagley, 1959, e Ragan, 1973, *in* Costa, 1992). Esta metodologia é muito utilizada nas pedreiras que apresentam paredes verticais.

De acordo com a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM), o número adequado de medições da atitude de fracturas, que possibilita, após tratamento, a obtenção de bons resultados, pode variar de 80 a 300 (ISRM, 1978), dependendo da dimensão do maciço, da dispersão de atitudes detectadas e do detalhe requerido. Segundo Costa, 1992, para as pedreiras do Anticlinal e atendendo à sua dimensão, um número de medições variável entre 100 e 150 é aceitável.

A. Levantamento da direcção de uma camada de xisto

B. Levantamento da inclinação de uma camada de xisto

Figura 5.2 – Utilização da bússola para medir a direcção e a inclinação de um plano.

Atendendo à figura anterior e de acordo com a Figura 5.3, a informação que se recolhe de um plano de fractura, nomeadamente a sua atitude (direcção e inclinação do plano), pode ser representada de vários modos:

- N30W, 20 SW - em que N30W representa a direcção e 20SW a inclinação.
- 240 / 20 - em que 240 representa a direcção da linha de maior declive em relação ao norte (azimute) e 20 a inclinação da linha de maior declive.

A segunda nomenclatura é normalmente utilizada em programas computacionais para processar os dados recolhidos no campo, apesar da maioria dos programas actualmente existentes aceitarem os dois modos.

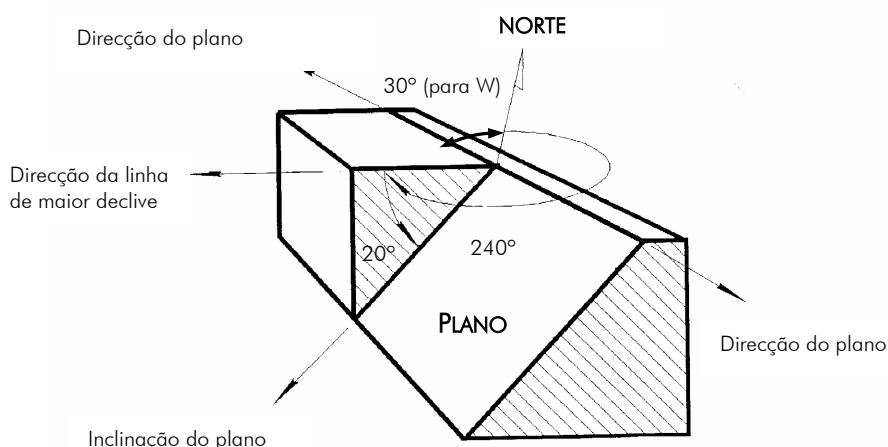



Figura 5.3 – Informação a recolher de um plano de fractura.

Os dados das atitudes das fracturas levantados no campo devem ser posteriormente tratados e interpretados através da sua representação em projecção estereográfica. Para o efeito, existem dois tipos de projecções que podem ser utilizados:

- *Projecção de igual área (rede de Schmidt)*

  Esta rede é, em geral preferida pelos geólogos, pois permite representar através de pontos todas as medições efectuadas, o que possibilita a identificação das famílias principais (zonas mais povoadas na rede) e a realização de estatísticas dos dados estruturais (curvas de isodensidades de fracturação). Esta projecção é gerada pelo método apresentado na Figura 5.4

- *Projecção de igual ângulo (rede de Wulf)*

  Este tipo de representação é muito utilizada pelos engenheiros, uma vez que permite construções geométricas que resultam em soluções para os problemas em

estudo, possibilitando analisar situações de instabilidade (formação de cunhas, tombamento, direcções preferenciais de escorregamentos de blocos, etc.). Esta projecção estereográfica é gerada através do processo apresentado na Figura 5.5. Para representar os dados neste tipo de projecção é necessário identificar o hemisfério onde esta é efectuada (hemisfério Sul ou Norte), uma vez que a informação aparece nos dois hemisférios tal como se pode observar na Figura 5.6.

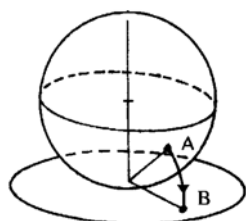
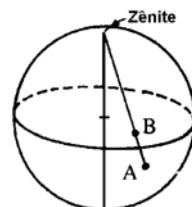



Figura 5.4 – Método construtivo da projecção de igual área.
(adaptado de Hoek e Brown, 1980)

Figura 5.5 – Método constructivo da projecção de igual ângulo.
(adaptado de Hoek e Brown, 1980)

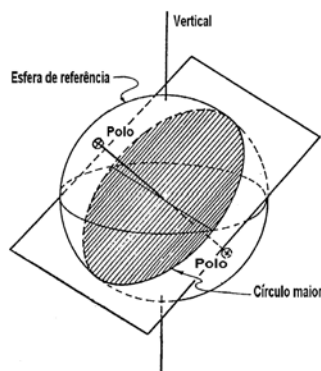
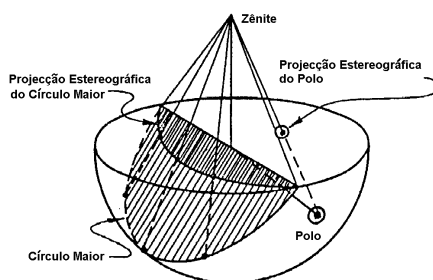
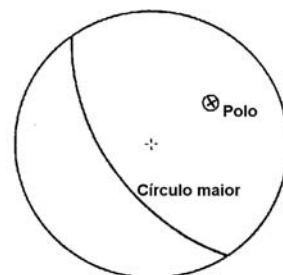
O tratamento deste tipo de informação, qualquer que seja a projecção, pode ser realizado com recurso a programas computacionais, permitindo resultados do tipo dos que se apresentam na Figura 5.7.

A. Círculo e pólos que definem a orientação e a inclinação de um plano

B. Projecção do círculo e do polo no hemisfério inferior

C. Representação do plano através do traço do círculo e do polo na projecção estereográfica de igual ângulo (hemisfério Sul ou inferior)

Figura 5.6 – Representação de um plano de fractura na projecção estereográfica de igual ângulo.
(adaptado de Hoek and Brown, 1980)

O *espaçamento* entre fracturas da mesma família é um espaçamento aparente, dado que o plano onde se está a fazer o levantamento (piso ou frente da pedreira) raramente é perpendicular ao plano das fracturas. Este espaçamento aparente pode ser determinado do seguinte modo:

$$e_a = L / n$$

em que : e_a – espaçamento aparente [unidades de comprimento]
L – comprimento do levantamento [unidades de comprimento]
n – número de fracturas existentes da mesma família

A. Projecção dos pólos dos planos de fractura no hemisfério inferior da rede de *Schmidt*

B. Diagrama de isodensidades de fracturação, representado no hemisfério inferior da rede de *Schmidt*

C. Projecção dos planos das principais famílias de fracturas no hemisfério inferior da rede de *Wulf*

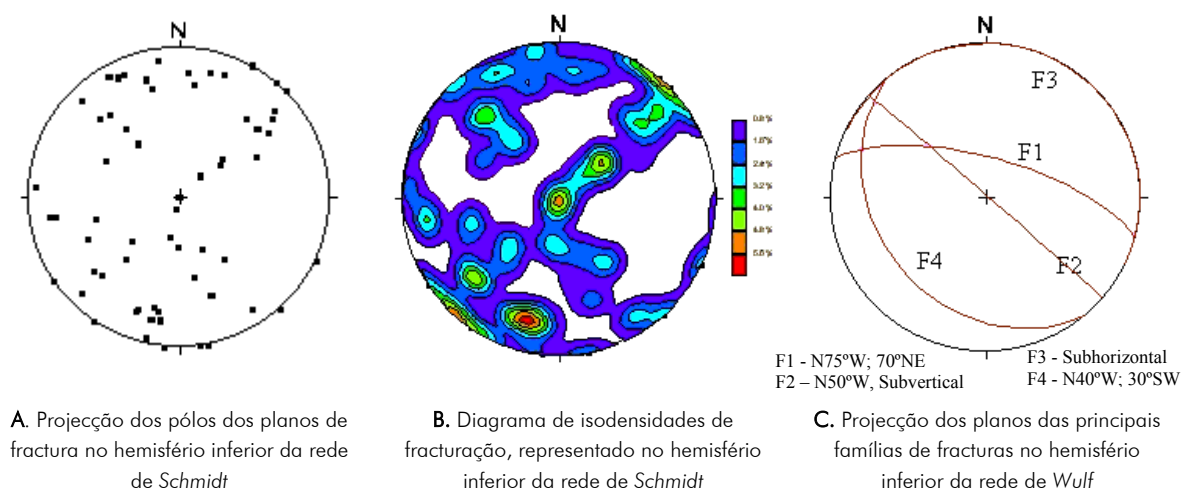



Figura 5.7 – Exemplos dos resultados obtidos com o tratamento computacional das atitudes levantadas numa pedreira.

No campo, o parâmetro prático mais utilizado é denominado frequência de fracturação e vem dado por:

$$f = 1/e_a$$

Caso se pretendesse determinar o espaçamento verdadeiro (e_v) entre fracturas da mesma família, ter-se-ia que aplicar a seguinte expressão:

$$e_v = e_a \cos \alpha \text{ sen } \beta$$

em que: α - ângulo entre a normal às fracturas no plano de observação e a horizontal.

β - ângulo entre o plano que contém a direcção de inclinação verdadeira e o plano de observação.

O estudo do grau de ***continuidade*** de determinada família de fracturas pode ser importante para o estudo da blocometria da pedreira e da estabilidade dos taludes da exploração. Esta característica pode ser avaliada através da observação, num determinado volume, da continuação das fracturas, analisando as suas terminações.

Uma vez na posse das informações suficientes relativas às características físicas e geométricas das fracturas, recolhidas durante o levantamento de campo, é possível avaliar, preliminarmente, a blocometria disponível para exploração. Os blocos definidos pela compartimentação do maciço marmóreo apresentam duas características importantes sob o ponto de vista da exploração, nomeadamente:

Dimensão – é função do espaçamento, do número de fracturas e da sua continuidade;

Forma – é função do número de famílias de fracturas e da sua orientação.

O cálculo da dimensão média do bloco unitário, que representa a blocometria existente no jazigo marmóreo, pode ser realizado através dos seguintes métodos:

Dimensão média do bloco unitário (I_b)

$I_b = (e_1 + e_2 + e_3)/3$ sendo e_1, e_2 e e_3 espaçamentos das três principais famílias

Índice Volumétrico (I_v)

$I_v = f_1 + f_2 + f_i \ldots + f_{al}$ (n.º fracturas/m^3)

sendo: f_i – frequência de fracturas da família i ($f_1 = 1/e_1$);
f_{al} – frequência de fracturas aleatórias (que não pertencem a nenhuma família).

Com base nos valores determinados para estes parâmetros é possível inferir a blocometria existente, embora condicionada pela quantidade e qualidade dos dados recolhidos.

Através dos dados levantados pode-se determinar o volume médio de blocos expectáveis, num determinado volume da jazida, antes de esquadrejados. Esse volume pode ser determinado pela seguinte fórmula (Grossman, 1987):

$$V_B = \frac{e_1 \times e_2 \times e_3}{\sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\tau + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\tau}}$$

em que: e_1 – espaçamento médio da primeira família de descontinuidades;
e_2 – espaçamento médio da segunda família de descontinuidades;
e_3 – espaçamento médio da terceira família de descontinuidades;
α- ângulo formado entre as orientações médias da segunda e terceira famílias de descontinuidades;
β- ângulo formado entre as orientações médias da primeira e terceira famílias de descontinuidades;
τ - ângulo formado entre as orientações médias da primeira e segunda famílias de descontinuidades;

Note-se que quando $\alpha = \beta = \tau = 90^a$, tem-se $V_B = e_1 \times e_2 \times e_3$

Através dos dados recolhidos é também possível estudar a blocometria com o auxílio de programas computacionais (ex.: COMPART). Para um determinado volume do maciço marmóreo, no qual foram estudadas as fracturas presentes, pode-se analisar a forma, a dimensão e a curva granulométrica dos blocos existentes para exploração, tal como se pode observar na Figura 5.8.

A título informativo, e de acordo com vários autores, apresentam-se as dimensões óptimas do bloco de mármore à boca da pedreira, em função das exigências do mercado:

- Bloco de rocha ideal (segundo Carvalhosa *et al.*, 1987) – 3.0×1.5×1.4 m^3
- A óptima situação do ponto de vista comercial é quando o bloco de mármore se apresenta como um paralelepípedo de 2.5-3.0 m de comprimento, 1.2-2.0 m de

altura e 1.2 – 2.0 m de largura. Esta dimensão dos blocos permite a redução dos custos a jusante, na transformação do bloco, e óptimas cotações para os blocos à boca da pedreira (Bradley, 1999);

- Segundo Miranda (1991), os blocos de dimensões mínimas devem possuir 1.5×0.8×0.6 m^3 e as dimensões máximas não devem exceder 3.2×1.85×1.6 m^3.

A. Representação dos planos de compartimentação existentes num dado volume de rocha

B. Curva granulométrica dos blocos individualizados pela compartimentação representada em A

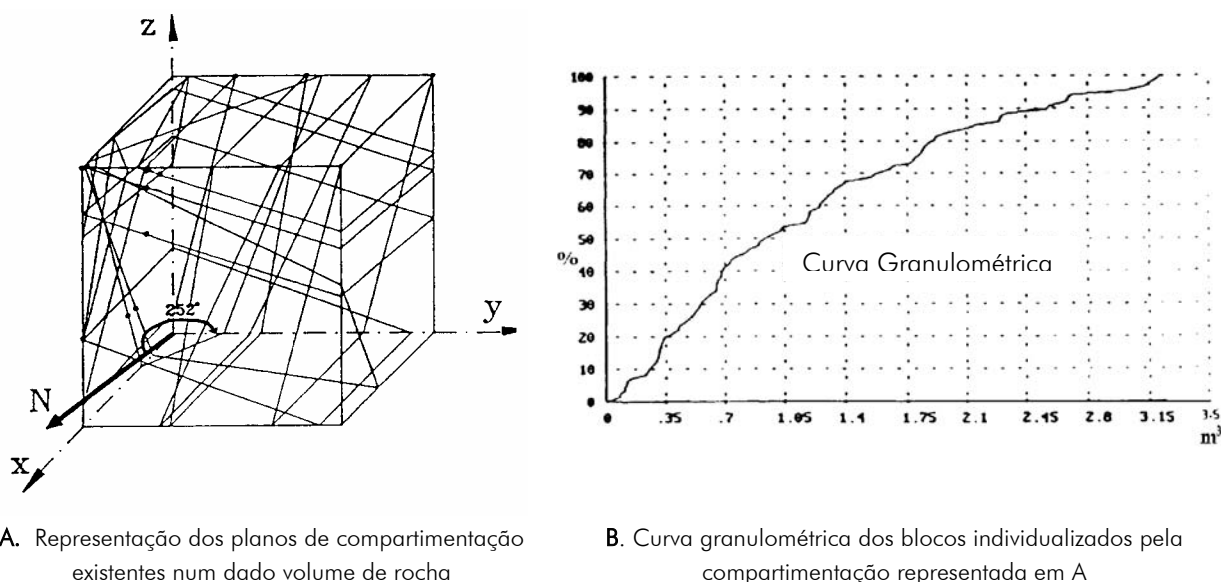



Figura 5.8 – Resultados da utilização do programa COMPART para estudo da blocometria existente num determinado volume de maciço em função da sua compartimentação.

(fonte: Gama e Bastos, 1994)

5.2.3. PROSPECÇÃO EM PROFUNDIDADE

O estudo da jazida em profundidade pode ser realizado com recurso a vários métodos, nomeadamente através da prospecção geofísica ou da execução de sondagens mecânicas com recolha de testemunhos. Durante esta fase de prospecção geológica deverão ser realizadas as acções que constam do Quadro 5.5 e obtidos os resultados nele apresentados.

Quadro 5.5 – Acções a desenvolver e resultados a obter com a prospecção em profundidade.

ETAPA 1.1 - PROSPECÇÃO GEOLÓGICA		
ACTIVIDADE	*ACÇÕES/MEIOS*	*RESULTADOS A OBTER*
1.1.3. Prospecção em Profundidade	Prospecção geofísica Planeamento de sondagens mecânicas Realização de sondagens Elaboração de *logs* de sondagem Elaboração de cortes geológicos	Informações geológicas em profundidade Definição da camada alterada de superfície Estudo do comportamento das litologias em profundidade Estudo da fracturação em profundidade Interpretação geoestrutural do jazigo mineral

Nos dois capítulos seguintes serão estudados os métodos geofísicos mais utilizados e adequados ao estudo de jazigos marmóreos, bem como os aspectos a ter em conta na programação e interpretação de uma campanha de sondagens.

5.2.3.1. PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

A prospecção geofísica permite, através de técnicas indirectas, detectar e interpretar anomalias verificadas nos maciços rochosos. Como métodos geofísicos a aplicar na prospecção de maciços marmóreos, destacam-se os seguintes:

- Sísmicos (sísmica de refracção)
- Eléctricos
- Electromagnéticos

O método a utilizar depende do objectivo que se pretende atingir. Neste contexto, apresenta-se no quadro seguinte uma breve descrição dos vários métodos referidos.

Quadro 5.6 – Métodos de prospecção geofísica aplicáveis a maciços marmóreos, seus objectivos e principais características.

	Objectivos	Características
Sísmica de refracção	Aplicável na detecção de espessuras de alteração e de solos de cobertura	Baixo custo com bons resultados até 20 m de profundidade
Métodos eléctricos	Aplicável na detecção de falhas, fracturas, cavidades cársicas e posições do nível freático	Alcance da ordem dos 100 m de profundidade
Métodos electromagnéticos	Igual ao método eléctrico, podendo utilizar geo-radares para detecção de perfis de reflexão de ondas electromagnéticos	Possui um alcance que varia entre 35 e 100 m. Para maciços marmóreos apresenta bons resultados para profundidades da ordem dos 10 m

As principais vantagens da utilização de métodos geofísicos na fase preliminar de prospecção de uma pedreira de rocha ornamental, residem no seguinte:

- São relativamente económicos;
- Geralmente a obtenção de dados e sua interpretação pode ser realizada em pouco tempo;
- Revelam-se pouco destrutivos.

De seguida passam-se a descrever os principais métodos de prospecção geofísica que podem ser utilizados na prospecção de mármores.

<u>*Sísmica de Refracção*</u>

Este método consiste no estudo da propagação de ondas sísmicas no terreno. A velocidade de propagação destas ondas, são função do tipo de material, da estrutura do material, da composição, da densidade e da presença de água e de vazios, entre outros.

Os dois tipos principais de ondas sísmicas são:

Ondas longitudinais (primárias ou P) – as partículas vibram segundo a mesma direcção de propagação da onda. São ondas de compressão nas quais a velocidade é maior que nos outros tipos de ondas, podendo transmitir-se nos meios líquidos.

Ondas transversais (secundárias ou S) – as partículas vibram perpendicularmente à direcção de propagação da onda. São ondas de corte e a sua velocidade é menor, não se propagando em meios líquidos.

Os estudos sísmicos necessitam de uma fonte de energia (martelo, explosivos, etc.), de detectores (geofones) e de um equipamento de gravação dos dados (sismógrafo). Através do registo sismográfico é possível determinar as velocidades de propagação das ondas P e S nos materiais atravessados (V_p e V_s), bem como as profundidades de contacto (Geoconsult, 1995).

A partir das velocidades das ondas sísmicas (V_p e V_s), podem-se estudar as propriedades do terreno, tais como o grau de fracturação e de alteração, e ainda o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson dinâmicos, mediante as expressões abaixo indicadas, nas quais o γ corresponde ao peso específico do terreno.

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2\left(V_p^2 - V_s^2\right)}$$ *Coeficiente de Poisson Dinâmico*

$$E_d = \gamma\, V_s^2\, \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}$$ *Módulo de Elasticidade Dinâmico*

O método sísmico de refracção pode também ser utilizado no interior de furos, existindo para tal várias técnicas de estudo possíveis, nas quais o geofone pode ser colocado à superfície, sendo a onda gerada em profundidade, ou vice versa (*Up hole e Down hole)*. Podem ainda ser realizados estudos com recurso a vários furos de sondagem, gerando-se a onda num deles e fazendo o registo nos outros (C*ross hole*).

Métodos Eléctricos

O método de resistividade eléctrica consiste na sujeição do terreno a uma determinada corrente eléctrica, registando a distribuição da diferença de potencial na superfície do mesmo. Com este método é possível estudar fenómenos associados a diferenças de resistividade, nomeadamente cavidades, contrastes geológicos (ex.: presença de intercalações de materiais metálicos), entre outros.

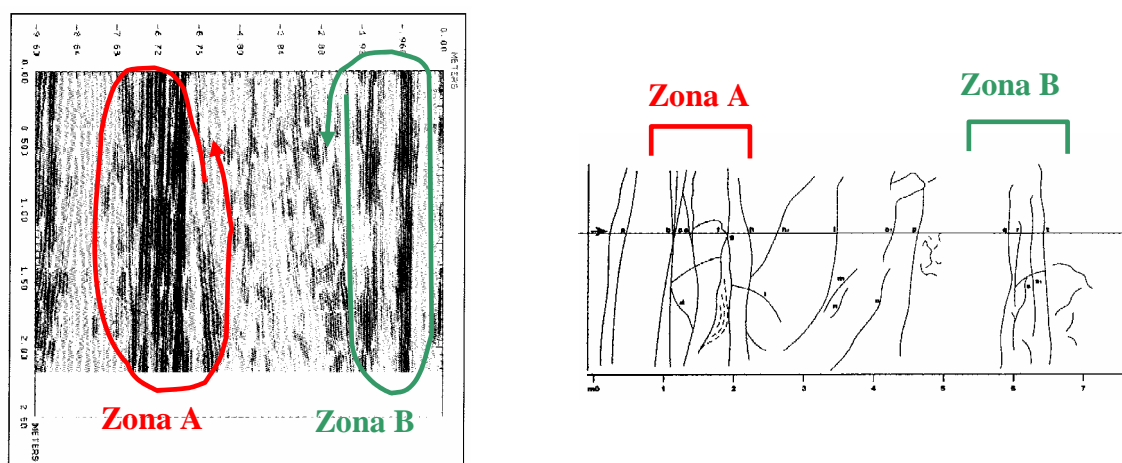
Neste método as grandezas medidas são a intensidade de corrente e a diferença de potencial, que permitem calcular as resistividades das formações e as suas profundidades. Atendendo ao posicionamento dos emissores e receptores (emissores – fonte de alimentação e receptores – voltímetro), o estudo pode ser realizado em profundidade ou lateralmente. A interpretação dos resultado é efectuada com base na elaboração de perfis de resistividade, ou seja, na representação

gráfica dos valores de resistividade em função da respectiva distância do conjunto de emissor e receptores, analisando as diferenças detectadas.

Métodos Electromagnéticos

O método electromagnético mais utilizado na prospecção de rochas ornamentais é conhecido como geo-radar ou GPR ("*Ground Penetration Radar*"). Trata-se de um aparelho que usa ondas electromagnéticas desfrutando do princípio do radar. É normalmente utilizado para prospecção subterrânea e baseia-se na propagação de ondas electromagnéticas na rocha, sendo a sua velocidade função da qualidade da mesma. O decréscimo da velocidade pode estar relacionado com a presença de fracturas, microfissuras e/ou de porosidades. O caminho da onda (reflexão ou refracção) indicia a presença e posição de planos de fractura ou de cavidades cársicas.

A onda emitida pelo geo-radar (um "curto" impulso electromagnético) propaga-se no mármore até encontrar uma fractura, a qual está geralmente preenchida com alguma substância com características dieléctricas diferentes, originando a reflexão de uma parte da energia para a fonte, o que vai revelar essa ocorrência. O movimento da antena confere uma resolução na direcção transversal, permitindo a obtenção de uma imagem bidimensional (2D), a qual pode ser comparada com a distribuição real das fracturas na área estudada (ver Figura 5.9). A sensibilidade para a revelação de fracturas está directamente ligada com o contraste dieléctrico entre o mármore e o material de preenchimento, dependendo da espessura deste último.

O geo-radar está equipado com um conjunto de antenas com frequências entre 100 MHz e 1 GHz. Quanto maior for a frequência, maior é a definição, mas menor será a penetração no terreno e vice versa. A experiência tem mostrado que a frequência de 500 MHz, nos mármores, é a que permite as melhores condições para o estudo em profundidade, com uma penetração da ordem dos 10 m. Para esta rocha e para profundidades mais elevadas os dados obtidos não são fiáveis (Bradley,1999).

A. Resultado obtido pela aplicação do método do geo-radar

B. Distribuição real das fracturas na área estudada

Figura 5.9 – Comparação entre os resultados obtidos na prospecção através do método electromagnético do geo-radar e a situação real.

(fonte: Bradley, 1999)

A principal vantagem deste método reside no facto de não ser destrutivo. Contudo, tem a desvantagem de não dar informação relativamente às características estéticas do material, e de não poder ser realizado por pessoal da pedreira, dada a complexidade na interpretação. É extremamente útil no estudo de pisos e frentes da pedreira, quer a céu aberto, quer em subterrâneo, podendo ser aplicado à superfície ou em furos.

5.2.3.2. PROSPECÇÃO COM SONDAGENS

A realização de sondagens assume-se como um método extremamente importante para o estudo geológico de jazigos de rocha ornamental, uma vez que proporciona uma informação directa do material existente em profundidade. Apesar disso, não deve ser esquecido que um testemunho de sondagem não é mais do que "uma linha recolhida do maciço" e que em zonas de complexidade geológica elevada, não permite tirar conclusões com elevado grau de certeza.

Comparativamente com os métodos de prospecção geofísica as sondagens apresentam várias vantagens, pelo facto de proporcionarem testemunhos do material existente em profundidade. De facto, as informações dadas pelos métodos geofísicos só permitem a identificação de alguns fenómenos geológicos penalizantes (zonas de fracturação, cavidades cársicas, etc.), e nada informam sobre a qualidade do material.

As principais informações provenientes dos testemunhos de sondagens apresentam-se sintetizadas no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Principais informações a recolher dos testemunhos de sondagem.

MEIO DE ANÁLISE	INFORMAÇÕES OBTIDAS
Observação visual dos testemunhos	Tipos de litologias e sua qualidade ornamental
	Fracturação e blocometria
	Fenómenos geológicos (falhas, filões, cavidades cársicas, etc.)
Observação visual dos testemunhos e medição com bússola	Orientação dos estratos
Observação visual dos testemunhos e medição das variações litológicas com fita métrica	Espessura das litologias
Observação visual dos testemunhos e medição de espaçamento de fracturas com fita métrica	Blocometria
Tratamento dos dados das litologias e da blocometria	Elementos para o cálculo de reservas (espessura das litologias com qualidade ornamental)
Realização de ensaios físico-mecânicos sobre os testemunhos de sondagens	Determinação das propriedades físico-mecânicas e geomecânicas (σ_c, σ_t, E, ν, etc.) dos tipos de rochas interceptadas

Uma das vantagens das sondagens, como foi indicado no quadro anterior, é a possibilidade de realizar ensaios mecânicos sobre os testemunhos. Os ensaios mais comuns a realizar nestas circunstâncias são:

No campo

- Esclerómetro (martelo de *Schmidt*)
- Carga pontual

No laboratório

- Compressão uniaxial (E, ν, σ_c)
- Compressão triaxial (ϕ e c)
- Resistência à flexão ($\sigma_{t\ por\ flexão}$)
- Resistência à tracção (método indirecto – ensaio Brasileiro) - (σ_t)
- Deslizamento de diaclases (ϕ_d e c_d)

Com a realização destes ensaios é possível estimar as propriedades geomecânicas dos materiais rochosos existentes no jazigo mineral que, como se terá oportunidade de estudar no capítulo 5.3, são de extrema importância para determinar as características geomecânicas do maciço rochoso interessado na exploração e, por conseguinte, contribuir para o dimensionamento dos desmontes. A realização de sondagens permite ainda, através dos testemunhos recuperados, estudar o polimento da rocha intersectada, com qualidade ornamental. Para isso, corta-se a carote ao meio (na direcção longitudinal) e procede-se ao polimento da face cortada.

As principais desvantagens das sondagens consistem no seu elevado custo e no facto de se tratar de uma amostragem pontual, carecendo a sua interpretação de cuidados particulares, pelo que deve ser analisada por técnicos habilitados (geólogos, engenheiros de minas ou outros).

5.2.3.2.1. Equipamentos

Para realizar as sondagens existem diversos equipamentos disponíveis (sondas), sendo seleccionados em função da profundidade que se pretende atingir, da natureza dos materiais a perfurar e da técnica que se pretende utilizar. As sondas para prospectar mármores são normalmente rotativas e equipadas com coroas diamantadas que promovem a fragmentação da rocha. As coroas localizam-se na extremidade da coluna de varas (também conhecidas como hastes de perfuração) na qual está também instalado o tubo amostrador que recebe a amostra à medida que o furo avança em profundidade. Na Figura 5.10 apresenta-se um pormenor deste tubo amostrador. O método de recolha do testemunho do fundo do furo pode ser de dois tipos:

- Convencional – a recolha do testemunho é realizada após cada manobra, içando toda a coluna de varas até à superfície. Este método é bastante demorado, sobretudo no caso de sondagens a grandes profundidades pois exige muito trabalho de manobra.
- *"Wireline"* - este método consiste na recuperação do tubo amostrador através do vazio existente no interior das varas, por introdução de uma "pinça" ("*overshot*") suspensa por um cabo de aço e accionada por um guincho, capaz de trazer até à superfície, o tubo amostrador com a carote. Permite poupar tempo e energia na recolha dos testemunhos, incrementando, significativamente, a velocidade de perfuração.

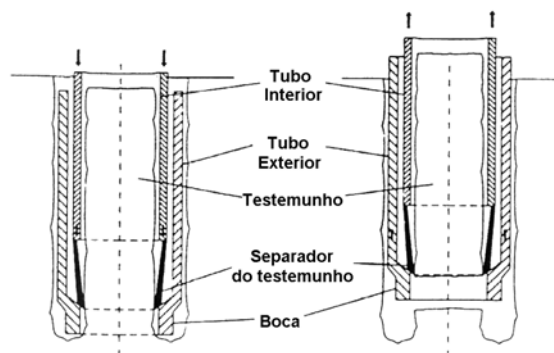



Figura 5.10 – Pormenor do tubo amostrador utilizado na recolha de testemunhos de sondagem.
(adaptado de Geoconsult, 1995)

Uma das operações importantes, para que muita da informação contida no testemunho de sondagem não se perca, consiste na orientação correcta do testemunho quando este chega à superfície. Os métodos mais simples para atingir este objectivo baseiam-se no conhecimento da geologia local (estratificação, xistosidade, principais famílias de fracturas, etc.), a qual fornece dados para o correcto posicionamento do testemunho em relação ao Norte, após o mesmo ter girado no interior do furo.

Nas situações em que a geologia se apresenta complexa e em que existe perda de material (descontinuidade no testemunho de sondagem), há necessidade de recorrer a métodos mais expeditos e fiáveis que permitam a orientação. Para isso, existem variados métodos e equipamentos dos quais, a título de exemplo, se descreve o sistema utilizado pela Atlas Copco-Craelius. Este método consiste num conjunto de pinos paralelos ao eixo de sondagem, instalados à frente da coroa diamantada, que instrumentam o perfil inferior do testemunho deixado no fundo do furo pelo avanço anterior, possibilitando a orientação do testemunho em relação à posição das varas e ao início do furo.

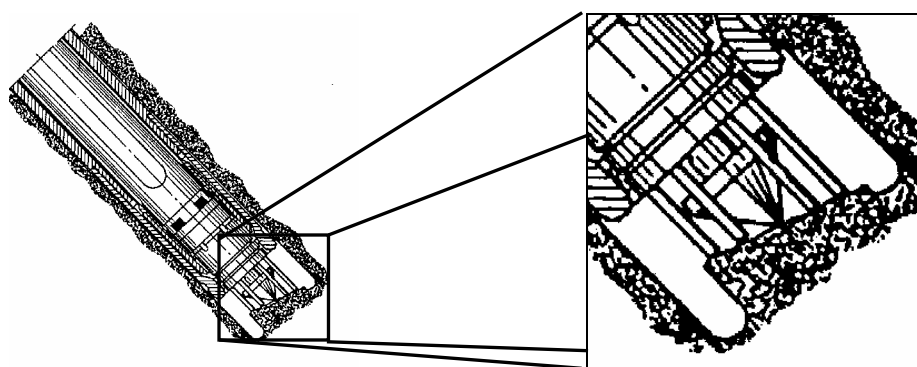
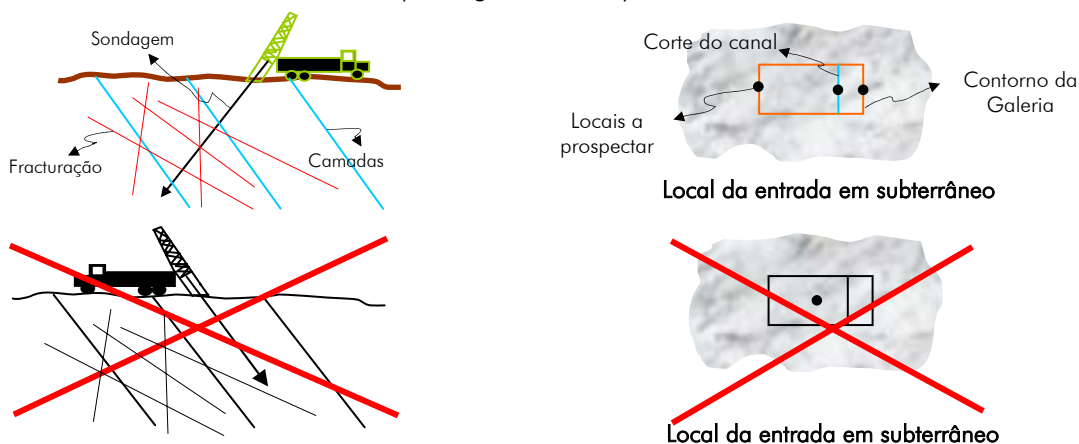



Figura 5.11 - Sistema de orientação dos testemunhos de sondagem comercializado pela Atlas Copco-Craelius.
(fonte: Hoek e Brown, 1980)

Existem outros métodos mais sofisticados, no entanto, são bastante mais dispendiosos e necessitam de equipamentos mais complexos. Um exemplo desses métodos consiste na observação das paredes do furo através de câmaras de televisão.

5.2.3.2.2. Características Técnicas

O planeamento de uma campanha de sondagens deve ser elaborado com bastante cuidado e assentar em critérios rigorosos, nomeadamente:

- Estudar as zonas onde a incerteza é maior;
- Sondar zonas com características geológicas complexas e controversas;
- Maximizar a recolha de informação com cada sondagem;
- Evitar realizar sondagens paralelas às camadas (ver Figura 5.12-A);
- Estudar o maciço na zona de abertura da galeria para início da exploração subterrânea (paralelamente ao eixo da galeria). Neste caso, deve tentar localizar-se o furo de modo a que a intercepção deste com as camadas de mármore não fique em zonas que possam penalizar o valor comercial dos blocos a extrair (aparecimento de furos nos blocos com qualidade ornamental). Se possível este deve ficar coincidente com o plano de corte do mármore no desmonte em subterrâneo (ver Figura 5.12-B).

A. A sondagem deve recolher a maior informação possível

B. A sondagem deve evitar furar os potenciais blocos a extrair da galeria

Figura 5.12 – Algumas regras básicas de planeamento das sondagens.

Atendendo aos critérios enumerados deve ser definido o plano de sondagens e as suas características técnicas, nomeadamente:

- Número de sondagens;
- Localização de cada sondagem;
- Inclinação;
- Direcção;
- Diâmetro do furo e da carote;
- Comprimento previsto de cada sondagem.

5.2.3.2.3. Análise dos Testemunhos

As sondagens constituem um método de prospecção em profundidade que, geralmente, é utilizado numa prospecção de detalhe em determinada área. Os principais parâmetros a analisar são os que se apresentam no quadro seguinte.

Quadro 5.8 – Principais parâmetros geológicos e geotécnicos a estudar nos testemunhos de sondagem.

PARÂMETROS GEOLÓGICOS	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS
• Identificação das litologias; • Espessura dos estratos; • Orientação estrutural das litologias.	• Recuperação de testemunhos; • RQD; • Troços sem fracturas com pelo menos 50 cm; • Atitude das descontinuidades; • Coeficiente de rugosidade JRC (*"Joint Roughness Coeficient"*) das descontinuidades; • Abertura, preenchimento e meteorização das descontinuidades; • Presença de água nas descontinuidades; • Famílias de descontinuidades; • Espaçamento entre descontinuidades.

Uma metodologia de análise dos testemunhos de sondagem, com vista à prospecção de mármores, pode ser a que segue as etapas indicadas no Quadro 5.9.

De referir que alguns dos parâmetros anteriormente mencionados, se determinam através de fórmulas, tais como:

a) Recuperação – A percentagem de recuperação de testemunho é dada pelo quociente entre o comprimento de testemunho recuperado (L_C) e o comprimento total do furo de sondagem (L_T) vezes cem, ou seja:

$$\text{Percentagem de recuperação} = (L_C/L_T)\times 100 \qquad (\%)$$

b) RQD – *"Rock Quality Designation"* (Deere e Merrit, 1966) - Fornece correlações com as características que definem a qualidade dos maciços rochosos em termos geotécnicos e de fracturação. O RQD vem dado pela seguinte fórmula (ver Figura 5.13).

$$RQD = \frac{\sum L_{\geq 10cm}}{L_T} \times 100 \ [\%]$$

em que:

L_T – comprimento sondado;
$\Sigma L_{\geq 10\,cm}$ – soma dos troços de testemunho não alterado com comprimento ≥ a 10 cm.

Exemplo prático atendendo à figura:

Considerando o comprimento total do testemunho de 200 cm e atendendo aos troços da figura, tem-se:

$$RQD = \frac{38+17+20+35}{200} \times 100 = 55\,\%$$

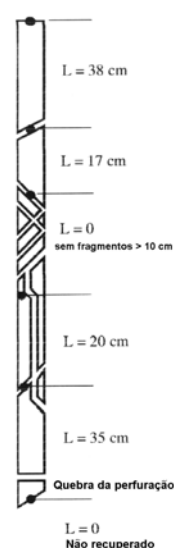



Figura 5.13 – Caso prático de determinação do RQD.
(fonte: Hoek, 1998)

Quadro 5.9 – Metodologia de análise de testemunhos de sondagem.

ETAPAS	ILUSTRAÇÃO
1. Delimitar as zonas do testemunho de sondagem com diferentes litologias, através da molhagem dos mesmos. Medir o comprimento dessas litologias, bem como a cota de início e de fim em relação ao início da sondagem.	Dolomito secundário; Mármore
2. Descrição das várias litologias presentes, classificando qualitativamente as que têm aptidão ornamental e atribuindo-lhes os nomes pelos quais são conhecidas comercialmente.	
3. Orientação dos testemunhos em função dos dados geológicos recolhidos no levantamento de superfície (por exemplo com o Norte).	Geratriz; N
4. Traçagem da geratriz que indica o Norte na superfície do testemunho.	
5. Análise da orientação estrutural das litologias presentes.	
6. Levantamento das fracturas anotando a profundidade a que se encontram (espaçamento), a sua inclinação e orientação (através da linha de maior declive do plano) pelo método apresentado na ilustração.	N; Linha de maior declive
7. Análise da superfície das descontinuidades em termos da sua rugosidade, da alteração, do preenchimento e da presença de água.	
8. Determinação da recuperação conseguida, do RQD, dos troços sem fracturas com mais de 50 cm, e do índice de fracturação linear característico do testemunho.	
9. Construção do *log* de sondagem contendo todas essas informações.	Mc
10. Interpretação dos resultados, do ponto de vista geológico através da construção de cortes geológicos.	

Atendendo ao valor do RQD o maciço rochoso pode ser classificado em termos geomecânicos, do modo como se apresenta no quadro seguinte.

Quadro 5.10 – Classificação dos maciços rochosos em termos geomecânicos em função do RQD.

(fonte: Deere e Miller, 1966)

RQD [%]	Qualidade do Maciço rochoso
0 –25	Muito mau
25 – 50	Mau
50 - 75	Razoável
75 - 90	Bom
90 - 100	Excelente

Segundo Palmström (1982), o RQD pode ser determinado com base numa superfície onde estejam expostas as descontinuidades do maciço, tal como uma frente de desmonte, em função do número de descontinuidades por unidade de volume e de acordo com a seguinte fórmula:

$$RQD = 115 - 3.3\ I_v \quad [\%] \qquad (RQD=100\%\ \text{para}\ I_v=4.5)$$

em que I_v (índice volumétrico apresentado no capítulo 5.2.2.2) corresponde ao somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento para todas as famílias de fracturas conhecidas.

c) Troços sem fracturas de comprimento maior ou igual a 50 cm – A representação destes troços no *log* da sondagem permite ter uma ideia do grau de penalização da blocometria disponível para exploração, uma vez que, de acordo com a experiência, a menor dimensão do bloco comercial não deverá ser inferior a 50 cm, para que as operações de transformação possam ser economicamente viáveis.

d) Índice de fracturação linear – Este índice pode ser calculado dividindo o número de fracturas encontrado num determinado comprimento, pelo valor desse comprimento. Este pode ser determinado por troços ou por furos de sondagem, atendendo somente às fracturas da mesma família ou contemplando para o cálculo todas as fracturas encontradas. No caso de contemplar só fracturas da mesma família este índice representa a frequência de fracturação (f) introduzida no capítulo 5.2.2.2.

À semelhança do que acontece com o estudo das litologias, a prospecção da fracturação do jazigo mineral realizada no levantamento de campo, por medição directa das diaclases, das falhas (conhecidas por "cabos"), dos filões (vulgo "cabos reais"), entre outros, pode ser complementada em profundidade pelo estudo dos testemunhos ou carotes de sondagem.

O estudo da fracturação em profundidade, no Anticlinal de Estremoz, reveste-se de extrema importância, uma vez que o comportamento detectado à superfície pode variar em profundidade, para os vários aspectos: famílias existentes, orientações, espaçamento, abertura, rugosidade, enchimento e percolação. Além disso, é de salientar que esta influencia os seguintes aspectos:

- Dimensão dos blocos a extrair;
- Método de desmonte a utilizar;
- Rendimento da exploração;
- Direcção de avanço das frentes;
- Forma dos blocos disponíveis para exploração.

5.2.4. MODELO GEOESTRUTURAL

5.2.4.1. DEFINIÇÃO

O modelo geoestrutural do jazigo marmóreo, tal como o nome indica, deve conseguir representar a estrutura do mesmo e constitui o resultado de toda a prospecção geológica. No Quadro 5.11

apresentam-se alguns meios que podem ser utilizados para definir o modelo geoestrutural, bem como as informações que deve conter.

Quadro 5.11 – Meios e informações envolvidas na definição do modelo geoestrutural do jazigo marmóreo.

(baseado em Costa, 1992)

ACÇÕES	ASPECTOS A OBSERVAR	INFORMAÇÕES A ENGLOBAR	IMPLICAÇÕES
Representação da jazida com base em cartografia geológica de pormenor e através de blocos-diagrama a 3D que possam conter a informação recolhida.	Perfil de alteração	Espessura da terra de cobertura. Carsificação (dimensão, preenchimento e profundidade). Dolomitização	Viabilidade económica da exploração Extensão de trabalhos preparatórios Percentagem de estéril Controlo da estabilidade
	Controlo estrutural e compartimentação	Estrutura da jazida: orientação e geometria das unidades litológicas ocorrentes Frequência, distribuição e extensão de falhas, filões e intercalações diversas Fracturas e superfícies estruturais (estratificação, xistosidade): atitude, espaçamento e continuidade	Definição do Plano de lavra Blocometria Qualidade da rocha Percentagem de estéril Cálculo de reservas
	Heterogeneidade	Variações laterais de fácies (cor, grão e vergada) Sequência (variações temporais). Inclusões sem interesse	Características ornamentais e factores penalizantes Variedades comerciais de rocha Cálculo de reservas
	Hidrogeologia	Posição do manto freático. Interferência da escavação com o aquífero Análise da rede de circulação de águas e da possibilidade de contaminação	Reservas de água disponíveis Necessidade de bombagem. Medidas de prevenção da contaminação das águas
	Mineralogia e petrologia	Descrição macroscópica Caracterização micropetrográfica	Definição de características de qualidade da rocha (resistência, etc.) e dos tipos e variedades ocorrentes na jazida Caracterização dos resíduos com vista ao seu aproveitamento
	Características físicas, químicas e mecânicas	Teor em elementos químicos relevantes Massa volúmica. Coeficiente de absorção Resistência à compressão, à flexão, ao desgaste, entre outros	

Nesta fase do estudo, deve ser elaborada uma carta geológica estrutural da jazida, integrando as informações recolhidas durante as anteriores etapas de prospecção.

As características físicas, químicas e mecânicas dos materiais com qualidade ornamental, devem ser conseguidas através de dados existentes na bibliografia ou da realização de ensaios, caso o material não se encontre estudado, ou exista necessidade de complementar os dados disponíveis.

Os resultados sintetizados neste modelo geoestrutural serão utilizados nas fases seguintes do estudo do jazigo mineral.

5.2.4.2. ZONAMENTO ORNAMENTAL

Para além do zonamento ornamental que se poderá realizar, para efeitos de ordenamento do território, com base em critérios espaciais e geológico-geotécnicos, importa também considerar o zonamento do recurso à escala da pedreira para que seja possível planear e gerir o jazigo marmóreo disponível, tanto em termos da sua qualidade, como ao nível da estabilidade geomecânica.

Para realizar o zonamento de uma pedreira, centrado no aspecto da qualidade ornamental, é necessário representar espacialmente toda a informação disponível. Nesse zonamento devem ser definidas zonas com características semelhantes do ponto de vista estético (cor, textura e grão) e de blocometria disponível para exploração.

Os volumes que constituem as várias zonas de características semelhantes, podem ser estabelecidas com base nos aspectos apresentados no quadro seguinte.

Quadro 5.12 – Características dos materiais que compõem o jazigo marmóreo e suas variações, que intervêm no processo de zonamento ornamental.

CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	VARIAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS
Aptidão Ornamental	Material com aptidão ornamental (mármore). Material sem aptidão ornamental (xisto, dolomito, filões, etc.).
Qualidade Ornamental (só aplicável às zonas de material com aptidão ornamental)	Cor: Rosa, branco, creme, anilado, azul, ruivina e outros. Textura: Sem vergada, com vergada ligeira, com vergada intensa e outros. Dimensão do grão: Grosso, grosso a médio, médio, médio a fino e fino.
Fenómenos Penalizantes (só aplicável às zonas de material com aptidão ornamental)	Intercalações de dolomito, de quartzo, de calcite ou outros.
Blocometria (só aplicável às zonas de material com aptidão ornamental)	Representada pelo volume do bloco médio, pelo índice de fracturação linear, pelo RQD e/ou pelos troços de testemunho de sondagem com mais de 50 cm, entre outros.

Através dos parâmetros anteriores e caso a caso, podem ser estabelecidas classificações que integrem os vários aspectos intervenientes e que permitam classificar cada uma das zonas do jazigo marmóreo em função da sua qualidade ornamental. A título de exemplo apresentam-se, no Quadro 5.13, cinco classes que poderiam ser consideradas para classificar as várias zonas, sendo apresentado para cada uma delas, em função das características ornamentais referidas no Quadro 5.12, alguns tipos de materiais que as satisfazem.

O zonamento pode começar por ser menos pormenorizado, quando os dados são escassos, e gradualmente melhorado à medida que se vão obtendo dados de campanhas de sondagens ou de outros estudos complementares.

Quadro 5.13 – Proposta de classificação qualitiva das zonas ornamentais e exemplos de materiais com aptidão ornamental que as satisfazem.

CLASSIFICAÇÃO DA ZONA	CARACTERÍSTICAS ORNAMENTAIS		
	Qualidade Ornamental	Fenómenos Penalizantes	Blocometria
Excelente qualidade ornamental	Mármore de cor rosa, branco ou creme, sem vergada e com qualquer dimensão de grão	Sem fenómenos penalizantes	Boa blocometria
Boa qualidade ornamental	Mármore rosa, branco e creme com vergada ligeira	Sem fenómenos penalizantes ou com alguns, mas pouco frequentes	Boa a média blocometria
Média qualidade ornamental	Mármore anilado	Aparecimento de alguns fenómenos penalizantes	Boa blocometria
Fraca qualidade ornamental	Mármore azul	Aparecimento de fenómenos penalizantes	Blocometria média
Sem qualidade ornamental	Mármore azul	Aparecimento de fenómenos penalizantes	Blocometria reduzida

O zonamento ornamental pode ser realizado a 2D, com base em cortes geológicos, ou em 3D utilizando blocos-diagrama representativos do jazigo mineral. Na Figura 5.14, é possível visualizar o zonamento da jazida com base num corte geológico.

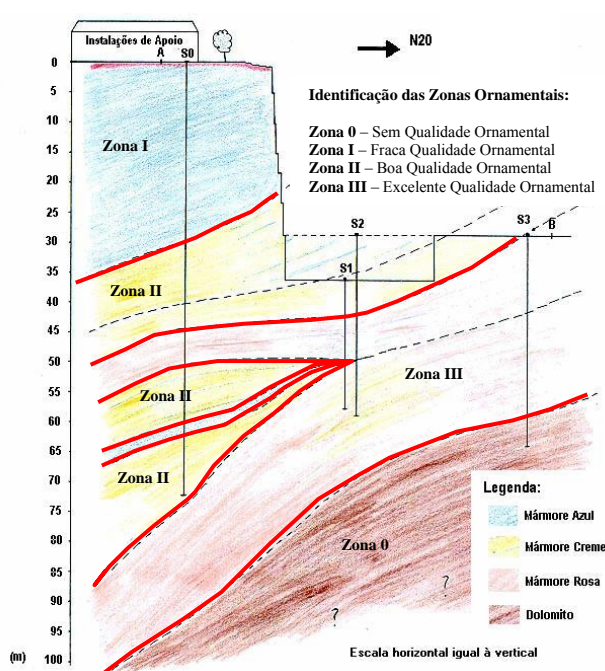



Figura 5.14 – Exemplo de um zonamento ornamental de um jazigo marmóreo.

O zonamento ornamental, cuja metodologia foi anteriormente apresentada, constitui uma ferramenta de extrema importância para o planeamento e gestão do recurso, pelo que a sua

realização no início da exploração, devia ser prática comum. Este tipo de abordagem também é válido para explorações a céu aberto.

A aplicação do zonamento à lavra subterrânea permite a obtenção de informação indispensável para a escolha do método de desmonte e da maximização da taxa de recuperação. No projecto de uma exploração, este zonamento poderá permitir:

- Localizar as zonas de implantação das instalações de apoio;
- Escolher zonas de deposição de escombros (sobre litologias sem valor comercial);
- Definir a localização das rampas;
- Planear os avanços;
- Escolher a abertura da galeria (lavra subterrânea);
- Definir os locais propícios para o posicionamento dos pilares (lavra subterrânea).

5.2.4.3. CÁLCULO DE RESERVAS

O cálculo de reservas deve ser efectuado quando existe informação suficiente sobre a localização e morfologia dos vários materiais com qualidade ornamental presentes na jazida e sobre o grau de fracturação que os afecta.

No cálculo das reservas de mármore de uma jazida determina-se o volume de cada material ornamental passível de ser explorado, considerando os condicionalismos de exploração presentes em cada local. Neste cálculo podem distinguir-se dois tipos de reservas:

Reservas Brutas: Volume total de reservas de mármore existente numa determinada área. Para o cálculo deste tipo de reservas é necessário possuir cartografia geológica e levantamento topográfico (ex.: escala 1/500), sendo este volume calculado com base nos seguintes aspectos:

- Continuidade e características da jazida em profundidade;
- Área passível de explorar, determinada em função do limite do terreno existente, de problemas de instabilidade e da tecnologia disponível, entre outros.

Reservas Úteis: Volume total de reservas subtraindo a quantidade de material com qualidade ornamental existente nas zonas de defesa. Estas zonas devem ser deixadas fora da área a explorar e apresentar uma dimensão concordante coma a legislação de pedreiras em vigor. São estas últimas que devem ser consideradas para o estudo de viabilidade do jazigo mineral.

Atendendo à metodologia que vem sendo apresentada, o cálculo de reservas pode ser efectuado com base nas cartas ou blocos-diagrama representativos do zonamento ornamental, para cada uma das zonas com qualidade ornamental definidas nesse mesmo zonamento.

5.3. CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

A caracterização geomecânica, conforme referido anteriormente, é fundamental para definir o modelo geomecânico do maciço, utilizando as técnicas de estudo definidas nos capítulos seguintes.

Os resultados de ensaios geomecânicos a realizar sobre rochas *in situ* e em laboratório, com vista à caracterização da sua deformabilidade e resistência, podem variar com os seguintes aspectos:

- Forma do provete;
- Dimensões do provete;
- Volume de rocha mobilizado;
- Técnicas de ensaio utilizadas.

A utilização das propriedades das rochas no que concerne à resistência e deformabilidade deve ser precedida de um conhecimento sobre o método como estes valores foram determinados, por forma a validar a sua utilização no estudo.

5.3.1. ENSAIOS *IN SITU*

A caracterização geomecânica do maciço rochoso onde se insere o jazigo marmóreo assume particular importância para o dimensionamento dos desmontes em subterrâneo. Para isso, existem vários ensaios que podem ser realizados *in situ* e que possibilitam a obtenção de resultados importantes sobre as propriedades geomecânicas do maciço rochoso. No Quadro 5.14 apresentam-se esses ensaios bem como os resultados que podem ser alcançados com os mesmos.

Quadro 5.14– Acções a desenvolver e resultados a obter com a realização dos ensaios *in situ*.

<u>ETAPA 1.2</u> – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA		
ACTIVIDADE	*ACÇÕES/MEIOS*	*RESULTADOS A OBTER*
1.2.1. Ensaios *In Situ*	Ensaio com esclerómetro (martelo de Schmidt) Ensaio de carga pontual Ensaios para determinação do estado de tensão preexistente	Resistência à compressão unixial das rochas Módulo de elasticidades do maciço rochoso Informação sobre os valores das tensões actuantes no terreno na zona de abertura da galeria, nomeadamente a tensão vertical e as tensões horizontais

Nos capítulos seguintes serão descritos os ensaios referidos no quadro anterior, no que diz respeito às suas características e técnicas de ensaio, e ao modo de tratamento e interpretação dos resultados obtidos.

5.3.1.1. ESCLERÓMETRO (MARTELO DE SCHMIDT)

O esclerómetro ou martelo de Schmidt é um instrumento portátil que permite a medição do "ressalto" por aplicação de uma determinada energia à superfície do material a testar. Este aparelho é usado empurrando o êmbolo do martelo contra a superfície a testar. Quando o êmbolo é largado origina a libertação de uma carga sobre a superfície a ensaiar, a qual reage originando um "ressalto" no martelo, que é designado por R (número de Schmidt). Este ressalto é registado instantaneamente numa escala existente no martelo, que pode ir de 10 a 100 (West, 1991). Na Figura 5.15 é possível observar o martelo durante a realização de um ensaio sobre uma superfície rochosa.

Figura 5.15 – Aspecto do esclerómetro ou martelo de Schmidt durante a realização de um ensaio.

Para o estudo das propriedades mecânicas das rochas, podem ser utilizados martelos do tipo N ou L, que possuem diferentes energias de impacto. Este equipamento de ensaio pode ser utilizado no estudo de frentes de pedreiras e superfícies de descontinuidade, entre outros.

O martelo de Schmidt deve ser calibrado para a temperatura do local a ensaiar, antes de ser utilizado, através da realização de um ensaio em material próprio (bigorna) fornecido pelo fabricante. Para os dois tipos de martelos referidos os valores dessas aferições devem ser (West, 1991):

Martelo do Tipo N $R = 79 \pm 2$
Martelo do Tipo L $R = 73 \pm 2$

Se no ensaio de calibração, o martelo não mostrar valores dentro dos intervalos referidos, deve-se proceder à sua correcção através das seguintes fórmulas:

Martelo do Tipo N $R = Rr \times 79/Ra$

Martelo do Tipo L $R = Rr \times 73/Ra$

em que: Rr - valor de R obtido na rocha
Ra - valor de R obtido no material de aferição
R - valor de R para o material ensaiado.

Se os valores de R obtidos na bigorna fornecida pelo fabricante, forem inferiores a 72 para martelos do tipo N e inferiores a 66 para martelos do tipo L, então este equipamento deve ser desmontado, limpo e recalibrado, pois não se encontra em condições de realizar as medições.

No uso do martelo é ainda necessário ter atenção ao estado da superfície a ensaiar, ou seja, se existir uma descontinuidade a separar a superfície de ensaio do maciço rochosos, deve-se escolher outra posição, pois os resultados obtidos nestas condições não são fiáveis. Além disso, a superfície a testar deve ser relativamente plana e limpa. Este ensaio apresenta as seguintes características principais:

- Permite estimar a resistência das rochas e o módulo de elasticidade de forma rápida e expedita;
- Trata-se de um ensaio não destrutivo;
- Pode ser utilizado em laboratório e no campo (equipamento portátil);
- Método pouco preciso quando utilizado fora da gama de rochas com resistência entre 20-150 MPa.

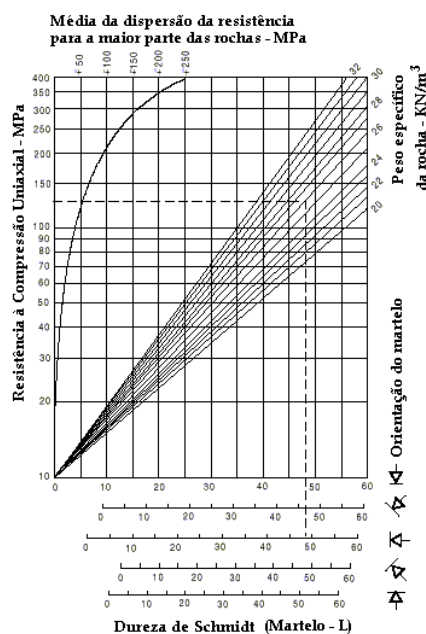
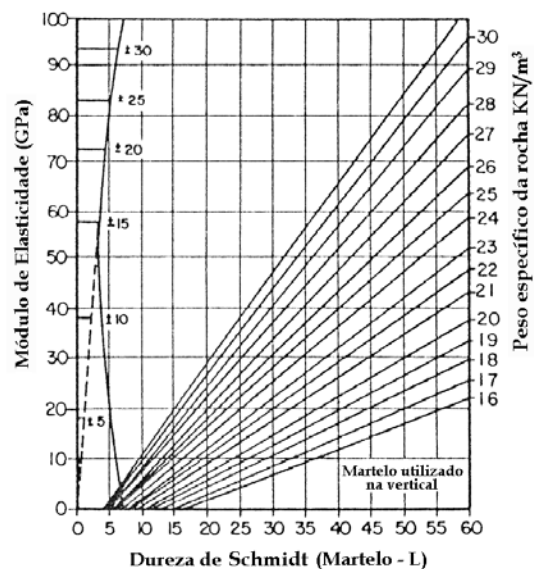
Como se viu anteriormente o princípio de aplicação deste equipamento, tem como base a aplicação de uma pancada através de uma massa de aço numa superfície de rocha, a qual reage, sendo essa reacção proporcional à sua dureza. Esta dureza é representada pelo valor do "ressalto" R, a qual é correlacionável com a resistência à compressão e com o módulo de elasticidade do material ensaiado. A resistência à compressão (σ_c) e o módulo de elasticidade (E) podem obter-se a partir dos ábacos que se apresentam na figura seguinte, entrando com o valor de R dado pelo martelo de Schmidt (tipo L) e com o valor da densidade da rocha ensaiada.

A. Ábaco para determinação da resistência à compressão (σ_c) (adaptado de Hoek, 1998)

B. Ábaco para determinação do módulo de elasticidade (E) (adaptado de Miller, 1965 *in* Stacey e Page, 1986)

Figura 5.16 – Ábacos que correlacionam o valor da dureza de Schmidt (R) com a resistência à compressão e módulo de elasticidade da rocha, para um martelo de Schmidt do tipo L.

5.3.1.2. ENSAIO DE CARGA PONTUAL

O ensaio de carga pontual é um ensaio simples de determinação da resistência à compressão de rochas intactas ou alteradas. Este ensaio pode ser realizado no campo, dado que o equipamento é, geralmente, portátil, sobre amostras de rocha não estandardizadas, também denominadas amostras de mão, o que constituí, efectivamente, a sua grande vantagem.

Trata-se de um equipamento relativamente leve, de fácil transporte e simples de utilizar, embora deva ser utilizado por pessoas com algum conhecimento das regras de ensaio, de modo a que os resultados sejam representativos.

O ensaio consiste na colocação da amostra entre dois êmbolos cónicos, medindo de imediato a distância entre ambos (D). Posteriormente, é aplicada uma carga, através de uma bomba hidráulica, cujo aumento conduz o material à rotura. A carga responsável pela rotura (P) do material é registada num manómetro de medida. Na Figura 5.17 encontra-se apresentado o ensaio de carga pontual.

Figura 5.17 – Equipamento do ensaio de carga pontual.
(Laboratório do CEVALOR)

O índice de carga pontual (Is) é dado pela seguinte fórmula:

$$Is = \frac{P}{D^2} \ (MPa)$$

em que: P – carga aplicada que origina a rotura do provete [MN];
D – distância entre os dois êmbolos no início da carga [m].

Como se referiu anteriormente, os provetes podem não ser cilíndricos. Nestes casos o valor de D vem dado por D_e, em que $D_e^2 = 4A/\pi$, e A=DW, tal como se ilustra na Figura 5.18.

Para a realização deste ensaio deve ter-se em atenção que o comprimento do provete deve possuir 1.5 vezes o seu diâmetro, para que os resultados possam ser fiáveis (Hoek e Brown, 1980). Do mesmo modo, devem desprezar-se os ensaios em que os provetes não rompam por planos diametrais à aplicação da carga, ou seja , quando apenas lascam (Mendes, 1985).

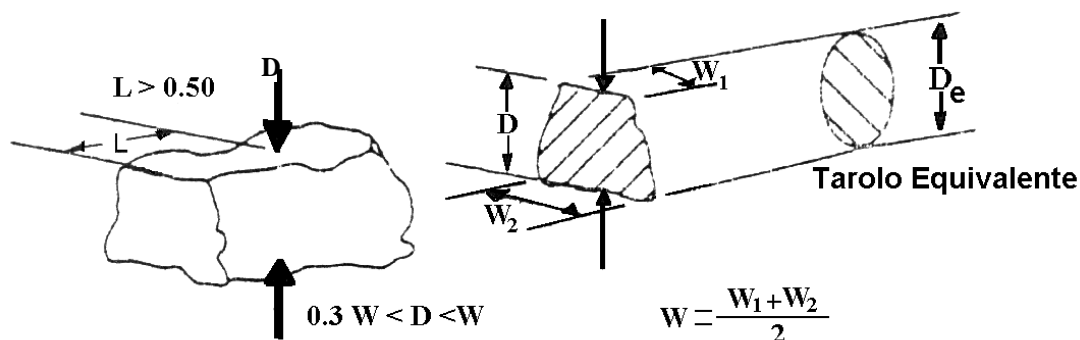



Figura 5.18 – Determinação de D em provetes não cilíndricos para o cálculo do Is no ensaio de carga pontual.

(fonte: Mendes, 1985)

Para determinar a resistência à compressão da rocha (σ_c), o valor de Is deve ser corrigido para o Is_{50}, relativo a um provete de diâmetro de 50 mm. Essa correcção pode ser efectuada através do ábaco que se apresenta na Figura 5.19.

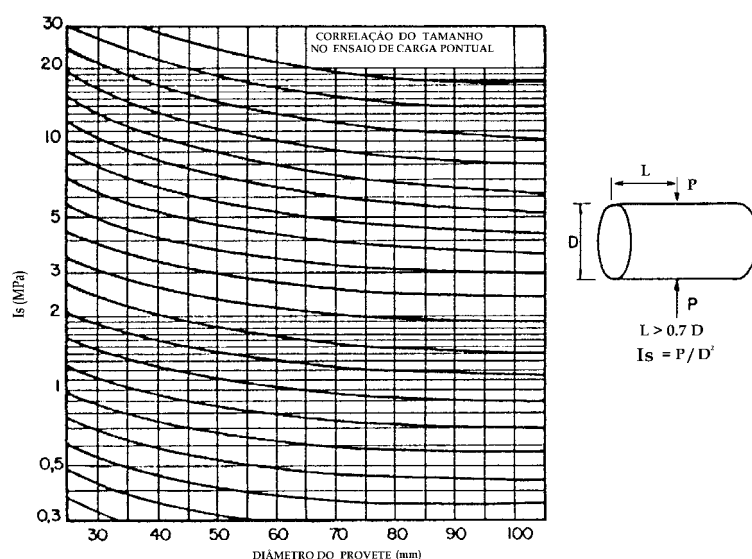



Figura 5.19 – Ábaco de correcção do Is para o Is_{50}, relativo a um provete de 50 mm de diâmetro.

(adaptado de Broch e Franklin, 1972, *in* Stacey e Page, 1986)

De acordo com muitos resultados empíricos e segundo vários autores, a fórmula que nos permite determinar a resistência à compressão da rocha, é dada por (ISRM, 1972):

$$\sigma_c = 24\ Is_{50} \quad (MPa)$$

Existem outras fórmulas, que permitem determinar a resistência à compressão da rocha, e que não necessitam da correcção do Is, como é o caso da seguinte expressão sugerida por Bieniawski (1975), *in* Hoek e Brown (1980):

$$\sigma_c = (14 + 0{,}175\ D)\ Is$$

em que D é expresso em milímetros.

Uma das grandes aplicações deste ensaio consiste na possibilidade de ensaiar no campo os testemunhos de sondagem, logo após a sua recolha.

5.3.1.3. MEDIÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO

O conhecimento do estado de tensão *in situ* no maciço rochoso revela-se fundamental para o estudo e previsão do comportamento geomecânico do maciço, face às alterações do campo de tensões resultantes da criação das cavidades mineiras.

Uma primeira aproximação, na ausência de informação sobre o estado de tensão existente, é admitir que o mesmo é função do peso do terreno sobrejacente (de altura h), admitindo que este é homogéneo, isótropo e contínuo. Deste modo vem:

$$\sigma_z = \gamma h \qquad \text{e} \qquad \sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \times \gamma h$$

As tensões horizontais (σ_x), como se observa através das fórmulas anteriores, são função do coeficiente de Poisson (ν) e da tensão vertical (σ_z).

É usual substituir $\sigma_z = P$ e $\sigma_x = \sigma_y = Q$, em que as duas componentes principais que definem o estado de tensão, estão relacionadas pelo coeficiente K.

$$K = \frac{Q}{P} = \frac{\nu}{1-\nu}$$

- Para $\nu = 0{,}5$ (valor máximo), $K = 1$ o que reflecte o **estado de tensão hidrostático**, $\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y$;
- Para $\nu = 0{,}25$ (valor típico dos maciços rochosos), $K = \downarrow$ o que reflecte um **estado de tensão geoestático**, $\sigma_z \neq \sigma_x = \sigma_y$ e $\sigma_x = \sigma_y \neq 0$;
- Para $\nu = 0$ (valor mínimo), $K=0$ o que reflecte a presença de um **terreno desconfinado**, $\sigma_x = \sigma_y = 0$ e $\sigma_z \neq 0$.

Esta abordagem, baseada na teoria matemática da elasticidade, pode ser útil para estimar o estado de tensão *in situ*, mas não concebe a existência de estados de tensão em que as componentes horizontais sejam superiores às verticais, o que na realidade se verifica. Segundo Buck (1956) *in* Mendes (1985), o relevo influência o estado de tensão, originando o aparecimento de tensões horizontais superiores às verticais perto da superfície. Este facto está dependente do estado de alteração e das compressões do terreno, podendo deixar de se verificar se superficialmente o maciço estiver meteorizado e descomprimido numa elevada espessura.

De acordo com Pinto (1990) o estado de tensão em função da topografia é caracterizado pela concentração de tensões nos vales, pelo aparecimento de tracções em zonas escarpadas ou em cavernas e pela rotação das direcções principais que tendem a ficar paralelas ou normais às encostas.

Também a água tem influência no estado de tensão, pois a variação do nível freático pode ser responsável pelo aumento ou diminuição do peso específico das rochas. O congelamento da água presente nas fissuras dos maciços rochosos é também um factor que altera o estado de tensão característico dos mesmos.

Outro facto que motiva o aparecimento de tensões horizontais superiores às tensões verticais, perturbando localmente o estado de tensão nos maciços rochosos, é o aparecimento de dobramentos (muito frequentes no Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa), desde que estes não se apresentem muito fracturados. A orientação destes fenómenos pode dar uma ideia da orientação provável do estado de tensão (Parker, 1973).

Em rochas metamórficas, como é o caso dos mármores, e segundo diversos autores, os estados de tensão podem revelar componentes horizontais superiores às verticais, em virtude dos aumentos de volume a que as mesmas foram sujeitas durante o processo de recristalização (Mendes, 1985), os quais devem ser tidos em consideração.

As tensões que actuam num determinado maciço rochoso podem ser classificadas do seguinte modo (Pinto, 1990):

- Tensões litoestáticas - devidas à acção da gravidade;
- Tensões latentes - origem tectónica;
- Tensões induzidas - devido à actividade humana;
- Tensões virgens ou iniciais - conjunto formado pelas tensões litoestáticas e latentes.

A determinação do estado de tensão *in situ* envolve algumas dificuldades, as quais residem nos seguintes aspectos (Mendes, 1985):

- Para obter valores representativos há que realizar um grande número de observações;
- Necessidade de realizar medições em várias direcções em torno de cada ponto de avaliação, com vista à caracterização das anisotropias existentes;
- A instalação de sistemas de medida introduzem geralmente alterações ao estado de tensão, pelo que os valores obtidos podem ser influenciados por essa alteração, reflectindo o estado de tensão preexistente.

Apesar destas dificuldades, os valores que se obtêm são extremamente importantes para o projecto dos desmontes, devendo estas, no entanto, vir reflectidas nos cálculos a efectuar e na capacidade crítica do engenheiro para aceitar ou recusar os resultados obtidos.

Para determinar as tensões *in situ* existem dois tipos de técnicas (Mendes, 1985):

- Libertação de tensões – consiste na criação de um vazio (superfície livre) que permite a expansão dum volume de rocha que se encontra comprimido.
- Restauração do estado de tensão – consiste no restauro do estado de tensão ao qual se forneceram anteriormente condições para a libertação de tensão.

Relativamente às duas técnicas apresentadas, existem vários métodos que se podem aplicar para determinação do estado de tensão preexistente, dos quais se destacam os seguintes (ver Figura 5.20):

Método da libertação de tensões

- Roseta extensométrica;
- Furos de sondagem;
- Tensómetro de diafragma
- "*Doorstopper*" (CSIR);
- Célula oca ou célula HI.

Método de restauração de tensões

- Macacos planos.

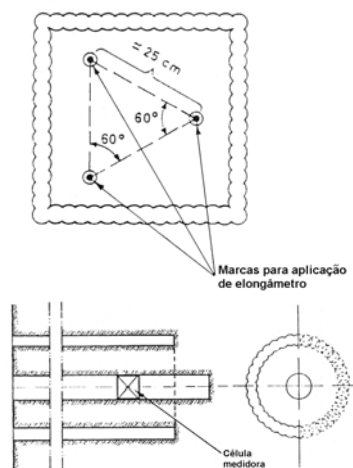



Figura 5.20 – Exemplo do método das rosetas e da utilização de furos de sondagem para determinação das tensões preexistentes.
(fonte: Mendes, 1985)

Existem outros métodos que permitem uma estimativa aproximada das tensões preexistentes, destacando-se a técnica de fracturação hidráulica. Com esta técnica é possível a medição de tensões até distâncias de 50 m, induzindo-se a fracturação através da aplicação de pressões hidráulicas na parede interna de um furo. Com base no conhecimento da pressão à qual as fracturas ocorrem e da direcção de fracturação, o estado de tensão *in situ* pode ser estimado.

Dos métodos anteriormente referidos o Método dos Macacos Planos ou SFJ ("*Small Flat Jack*") é um dos mais aplicados em maciços marmóreos, pela sua simplicidade e adequabilidade, pelo que lhe será dado maior destaque. O procedimento do ensaio encontra-se descrito e ilustrado na Figura 5.21. O número de rasgos que se efectuam são função das direcções segundo as quais se pretende estudar o valor da tensão preexistente. Normalmente, são realizados três rasgos, um horizontal para determinação de σ_v e dois verticais para determinação de σ_x e σ_y. Os rasgos verticais devem ser orientados em função da direcção a dar às galerias subterrâneas. Depois de se dar a libertação de tensões (passadas mais de 24 horas) introduz-se o macaco plano no rasgo, o qual é pressurizado até restituir a situação inicial antes da libertação de tensões. A fase de pressurização é realizada por patamares, registando-se sempre os valores medidos no elongâmetro e a pressão aplicada. O gráfico resultante da representação dos valores de deslocamento em função da pressão vai permitir determinar a tensão existente no maciço rochoso.

Para se obterem bons resultados com este ensaio é necessário que a superfície a ensaiar se apresente regular e que os rasgos sejam realizados suficientemente distantes uns dos outros, de modo a não existirem perturbações. Neste tipo de ensaio é ainda necessário ter em conta a localização das bases extensométricas de medição e a presença de fracturas ou de outro tipo de descontinuidades que podem afectar o resultado.

Com base nos valores da pressão registada e após algumas correcções, tais como a da temperatura, determina-se o valor da tensão instalada no maciço, na direcção correspondente à aplicação da pressão de restauro, ou seja, normal à orientação dos rasgos (σ_z - tensão vertical, σ_x e σ_y – tensões horizontais).

Etapas:

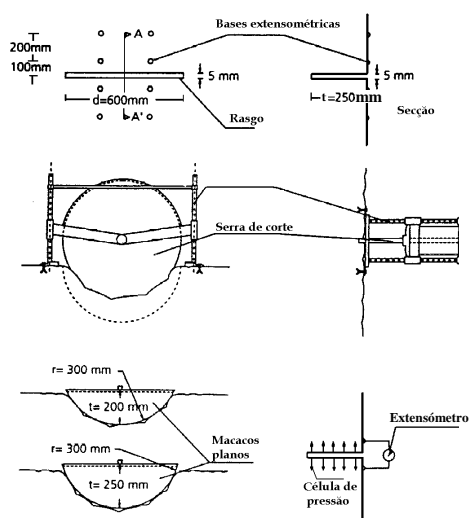
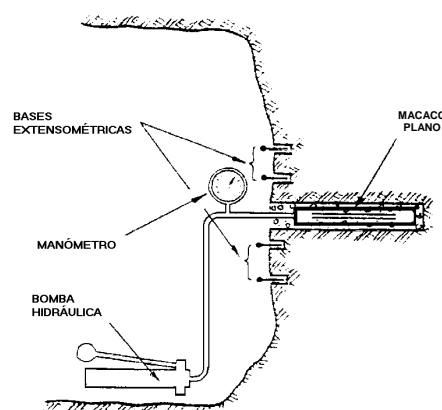
1. Colocação de bases extensométricas;
2. Leitura das distancias entre as bases;
3. Abertura do roço;
4. Aguarda-se que o maciço se deforme no sentido do vazio ;
5. Regista-se a deformação;
6. Instala-se o macaco plano;
7. Aplicação por patamares, da pressão capaz de anular as deformacões.

A - Procedimento para a realização dos rasgos e determinação das tensões *in situ* pelo método dos macacos planos (adaptado de Geoconsult, 1995)

B - Equipamentos intervenientes na fase de pressurização dos rasgos para restituição do estado de tensão preexistente (adaptado de Mendes, 1985)

Figura 5.21 – Metodologia e equipamentos para determinação do estado de tensão *in situ* através do método dos macacos planos.

O conhecimento do estado de tensão preexistente no maciço rochoso, antes de iniciada uma escavação, possibilitado por este ensaio, reveste-se de extrema importância para a manutenção da estabilidade da mesma e para o dimensionamento dos sistemas de sustimento a utilizar. Este método de estudo de tensões *in situ* pode ser utilizado também para analisar a evolução das tensões a que estão sujeitos os pilares dos desmontes subterrâneos, em função do tempo.

A principal desvantagem do método dos macacos planos reside na dificuldade de medir tensões de tracção.

5.3.2. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios de laboratório podem ser efectuados sobre amostras de mão recolhidas no local (pedreira ou terreno), ou sobre provetes preparados a partir de testemunhos de sondagem. A selecção das amostras a ensaiar deve ser realizada atendendo a que estas devem permitir:

- Avaliar as características mecânicas das várias litologias presentes no maciço, bem como das descontinuidades que lhes estão associadas, com o objectivo de zonar o maciço;
- Correlacionar os dados obtidos nos ensaios *in situ* com as características das rochas ensaiadas em laboratório.

Os ensaios laboratoriais que podem ser utilizados para caracterizar a rocha existente no maciço marmóreo, com vista à abertura de uma exploração subterrânea, e os resultados que deles se podem obter, podem ser vistos no Quadro 5.15.

Quadro 5.15 - Acções a desenvolver e resultados a obter com a realização dos ensaios laboratoriais.

ETAPA 1.2 – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA		
ACTIVIDADE	*ACÇÕES/MEIOS*	*RESULTADOS A OBTER*
1.2.2. Ensaios Laboratoriais	Ensaios dinâmicos Compressão uniaxial simples Compressão triaxial Resistência à flexão Ensaio brasileiro Ensaio de deslizamento de descontinuidades	Informações sobre as propriedades geomecânicas das rochas e das descontinuidades que constituem a jazida Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dinâmicos Resistência à compressão uniaxial Coesão e ângulo de atrito da rocha Resistência à flexão Resistência à tracção Coesão e ângulo de atrito das descontinuidades presentes em cada litologia

A informação obtida no ensaios laboratoriais deve complementar os resultados dos ensaios *in situ*, no sentido de possibilitar a definição de um ou vários modelos de comportamento do maciço rochoso, em função das suas características geológicas e geomecânicas

Os resultados dos ensaios laboratoriais a realizar sobre amostras, quer de sondagens, quer de mão, não podem ser directamente utilizados na caracterização do maciço rochosos sem que sejam ajustados à escala devida, uma vez que estes resultam do estudo feito sobre amostras de reduzidas dimensões quando comparadas com o maciço rochoso em estudo, tal como se terá oportunidade de estudar mais adiante.

5.3.2.1. ENSAIOS DINÂMICOS

Os ensaios dinâmicos têm como base a medição da velocidade de propagação das ondas sísmicas através de um provete de rocha. Para isso, utiliza-se um transmissor e um ou vários receptores colocados na amostra. Com base num osciloscópio é possível controlar e medir a propagação da onda, obtendo os valores da velocidade das ondas P e S, respectivamente V_p e V_s. Com base no valor dessas velocidades e através das fórmulas anteriormente apresentadas no capítulo 5.2.3.1, é possível estimar os parâmetros seguintes:

- Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)
- Coeficiente de Poisson dinâmico (ν_d)

Estes parâmetros podem ser comparados com os valores determinados pelos ensaios estáticos, seguidamente apresentados, de modo a analisar as diferenças registadas, com vista a uma análise

crítica. Além disso, podem ser utilizados para estudar o comportamento do maciço rochoso quando solicitado por cargas dinâmicas (ex.: circulação de máquinas, sismos, detonações, etc.).

5.3.2.2. COMPRESSÃO UNIAXIAL SIMPLES

Este ensaio deve ser realizado sobre um provete cilíndrico, de altura superior ou igual a duas vezes o seu diâmetro, com topos perpendiculares ao eixo onde se aplica a força. Para realizar o ensaio deve-se colocar o provete no centro do prato da prensa e aplicar sobre este uma força axial P que o levará à rotura. Na Figura 5.22-A é possível observar o equipamento utilizado neste tipo de ensaio, bem como os parâmetros que se podem estudar com o mesmo.

Através da medição das deformações longitudinais obtém-se a curva tensão-deformação da rocha a ensaiar, apresentada na Figura 5.22-B, a partir da qual se determina o módulo de elasticidade (E). Por sua vez, o coeficiente de Poisson (ν) é estimado através da análise da variação das deformações transversais e longitudinais, para os diferentes valores de tensão aplicados ao provete, utilizando a fórmula respectiva apresentada na Figura 5.22-B. É ainda possível determinar a resistência à compressão uniaxial (σ_c) que é dada pelo quociente entre o valor da força na rotura e a área da base do cilindro ensaiado.

A. Prensa que permite realizar o ensaio de compressão uniaxial simples equipada com gaiola *Stopani* para determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson (Laboratório de Geomecânica do IST)

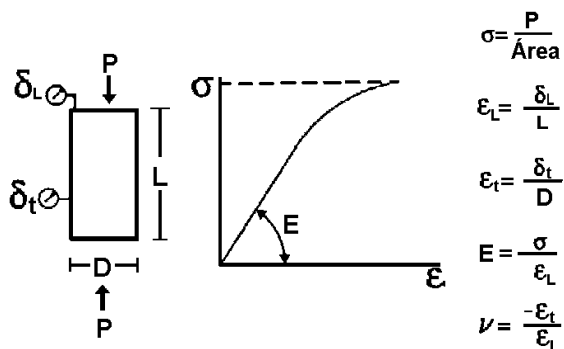
PARÂMETROS EM ESTUDO

B. Parâmetros a estudar durante a realização de um ensaio de compressão uniaxial simples

Figura 5.22 – Equipamento para realizar o ensaio de compressão uniaxial simples e parâmetros a determinar.

Na determinação do módulo de elasticidade de rochas é usual utilizar vários ciclos de carga descarga, em que o primeiro tem como objectivo ajustar o provete ao sistema de carga, enquanto os restantes permitem determinar esse parâmetro. Entre cada trajecto de carga e descarga deve-se esperar um certo tempo (cerca de 15 minutos) para verificar se existem comportamentos anelásticos das rochas (Mendes, 1985).

Os parâmetros a estimar com a realização deste ensaio, atendendo à Figura 5.22-B, são determinados do seguinte modo:

Resistência à Compressão Simples (σ_c) – é determinada levando o provete à rotura e registando o valor da carga máxima atingida. O valor de σ_c é calculado dividindo a carga máxima (P) pela área da base do provete ensaiado (Área), tal como se apresentou na fórmula correspondente da Figura 5.22-B.

Módulo de Elasticidade (E) e Coeficiente de Poisson (ν) – são determinados com base na curva de carga-descarga, geralmente até valores de 50 % da carga de rotura, e recorrendo às fórmulas respectivas apresentadas na Figura 5.22-B. Para isso deve-se conhecer previamente a tensão máxima de rotura da rocha.

Os ensaios de compressão uniaxial permitem estudar o efeito de escala na resistência à compressão das rochas. Segundo estudos de Bieniawski (1969) sobre provetes cúbicos de diferentes dimensões (arestas diferentes), verificou-se que a resistência à compressão diminuía até ao cubo de aresta 1,5 m e que a partir dessa dimensão a resistência à compressão mantinha-se praticamente constante com o aumento da dimensão do cubo, tal como se pode observar na Figura 5.23.

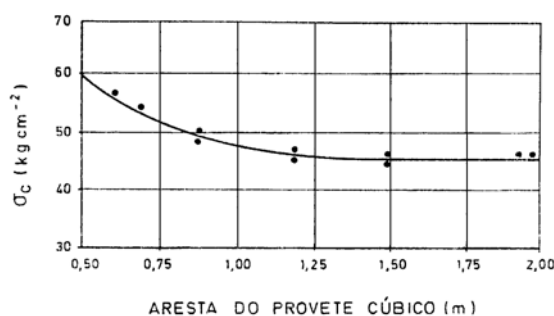



Figura 5.23 – Variação da resistência à compressão com a dimensão do provete de acordo com os estudo realizados por Bieniawski numa mina de carvão Sul-Africana.

(adaptado de Bieniwaski, 1969, *in* Mendes, 1985)

Idêntico comportamento é possível registar quando se analisa a variação da resistência à compressão das rochas em função da esbeltez do provete, ou seja, à medida que se aumenta a razão entre a sua altura e o seu diâmetro.

5.3.2.3. COMPRESSÃO TRIAXIAL

O ensaio de compressão triaxial consiste em carregar um provete cilíndrico de rocha com uma certa tensão lateral σ_3 aumentando a tensão axial σ_1 até à rotura do provete. Este procedimento deve ser repetido para um mínimo de três valores diferentes de σ_3. Representando os círculos de

Mohr correspondentes à rotura do material para três, ou mais, situações distintas no diagrama σ-τ, é possível definir a resistência da rocha com base na curva tangente a todos os círculos de rotura. Com base nesta envolvente retiram-se os valores dos parâmetros de resistência da rocha, nomeadamente o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c), tal como se pode observar na Figura 5.24.

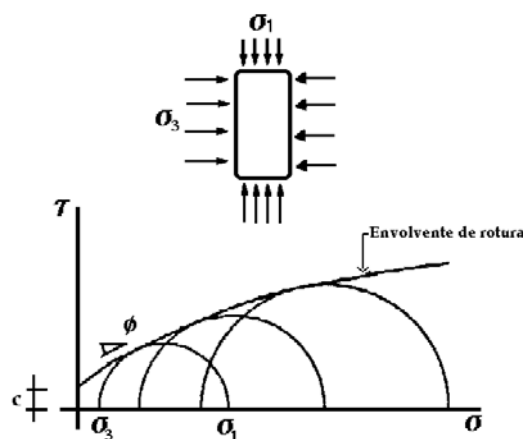
A. Prensa que permite realizar o ensaio de compressão simples equipada com a célula de Hoek (Laboratório de Geomecânica do IST)

B. Envolvente de Mohr para três ensaios de compressão triaxial com valores de σ_3 diferentes e respectivos parâmetros de resistência (c e ϕ)

Figura 5.24 - Equipamento para realizar o ensaio de compressão triaxial simples e parâmetros a estudar.

5.3.2.4. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Os ensaios que permitem determinar a resistência à flexão são muitas vezes utilizados para avaliar a resistência à tracção das rochas, embora estes ensaios originem valores de resistência à tracção inferiores aos determinados pelo método brasileiro, que será estudado no capítulo seguinte. Este facto motiva que estes ensaios só devam ser utilizados para fornecer uma medida aproximada desta propriedade.

O equipamento utilizado para a realização destes ensaios pode ser observado na Figura 5.25-A. Este tipo de ensaio consiste em aplicar uma carga ao provete na direcção diametral (ou segundo a direcção da sua menor espessura) e no centro de dois apoios sobre os quais o provete é colocado (ver Figura 5.25-B).

Conhecida a distância entre os apoios, a carga responsável pela rotura e as dimensões do provete, pode-se determinar a resistência à flexão da rocha, através da fórmula apresentada na Figura 5.25. O valor da resistência à flexão é função da carga de rotura (P), da distância entre os apoios (L), do diâmetro do provete (D) e da constante K, a qual depende das condições de ensaio, do tipo de rocha ensaiada e da geometria do provete.

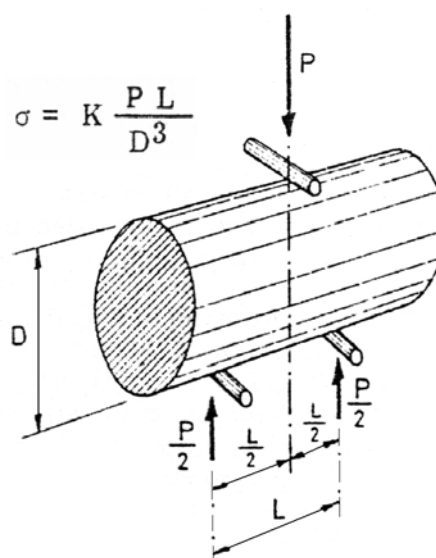
A. Prensa preparada para o ensaio de flexão (Laboratório de Geomecânica do IST)

B. Modo de carregamento do provete e fórmula de cálculo da resistência à flexão

Figura 5.25 - Equipamento para realizar o ensaio de resistência à flexão e respectiva fórmula de cálculo.

5.3.2.5. ENSAIO BRASILEIRO

Devido à extrema dificuldade na realização do ensaio de tracção directa, nomeadamente no que diz respeito à aplicação da força, é muito comum recorrer ao ensaio brasileiro que permite obter indirectamente a resistência à tracção da rocha. Este ensaio consiste em romper um provete cilíndrico de rocha, semelhante ao utilizado no ensaio de compressão uniaxial (comprimento maior ou igual a duas vezes o seu diâmetro), através da aplicação transversal da carga. A resistência à tracção da rocha (σ_t) é calculada em função da força de rotura e das dimensões do provete (diâmetro e comprimento), tal como se mostra na Figura 5.26.

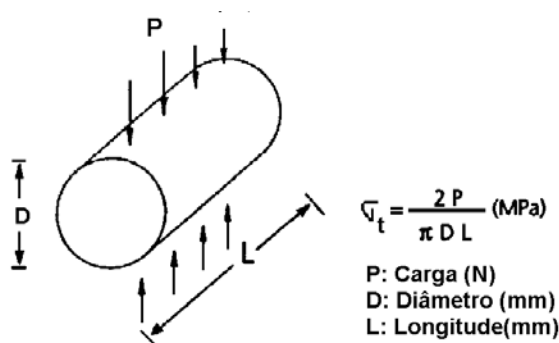



Figura 5.26 – Aplicação da carga no ensaio brasileiro e respectiva fórmula de determinação da resistência à tracção da rocha.

5.3.2.6. ENSAIO DE DESLIZAMENTO DE DIACLASES

Praticamente todos os maciços rochosos possuem descontinuidades com maior ou menor frequência. A baixas profundidades, nas quais as tensões são reduzidas, o comportamento do maciço é controlado pelo deslizamento das descontinuidades. Assim, para analisar a estabilidade dos blocos de rocha é necessário compreender os factores que controlam a resistência ao corte das descontinuidades que os separam (Hoek, 1998).

Para determinar os parâmetros de resistência das descontinuidades, é usual realizar ensaios de corte. Para tal, coloca-se a amostra numa caixa própria, na qual é fixada com a aplicação de cimento. Essa caixa é constituída por duas metades que possuem a capacidade de deslizar uma sobre a outra, sendo o plano de deslizamento coincidente com o plano de descontinuidade (ver Figura 5.27-A).

A. Equipamento e procedimento de ensaio (Laboratório de Geomecânica do IST)

B. Resultados do ensaio: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) (fonte: Geoconsult, 1995)

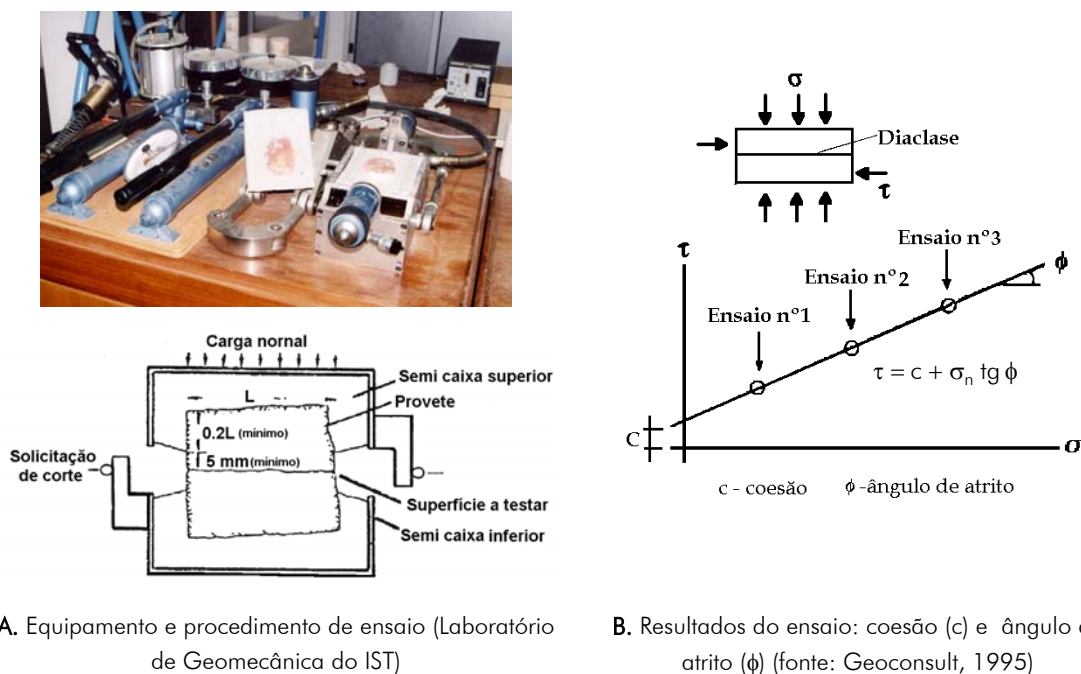



Figura 5.27 – Procedimento do ensaio de deslizamento de diaclases e determinanação dos parâmetros de resistência ao corte das diaclases.

Este ensaio permite medir os parâmetros de resistência ao corte de uma fractura. Para tal, aplica-se uma carga normal (σ) ao plano da fractura que se mantém constante, aumentando a carga transversal (τ) até à rotura. Deste processo resulta um par de valores (σ,τ) correspondentes à rotura da diaclase. Através da repetição deste processo para, pelo menos, três valores diferentes de σ obtém-se, por regressão linear, a recta de rotura característica da fractura em análise, ou seja a recta de Mohr-Coulomb correspondente. Com base nesta recta é possível determinar os parâmetros que caracterizam a resistência ao corte da fractura, nomeadamente o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão aparente (c), tal como se mostra na Figura 5.27-B. Com base nesta figura, verifica-se que à medida que se aumenta a tensão de corte (τ) origina-se um deslocamento δ de uma semi-caixa em relação à outra. Se a **descontinuidade** for **planar** os resultados obtidos consistem em gráficos semelhantes aos que se apresentam na Figura 5.28-A.

Como se pode observar na Figura 5.28-A, de um modo geral, a resistência ao corte aumenta até um máximo chamado **resistência ao corte de pico**, a partir do qual, continuando o deslocamento, a resistência decai para o que se chama **resistência ao corte residual**. Quando é atingido um determinado valor de deslocamento, a resistência ao corte assume o valor residual, sendo normalmente a coesão residual igual a zero.

Dificilmente as descontinuidades são totalmente planas, ou seja, apresentam sempre alguma rugosidade. De acordo com Patton (1966), os ensaios levados a cabo em **descontinuidades rugosas** mostram que a equação de Mohr-Coulomb deve ser escrita tal como se apresenta na Figura 5.28-B. Se a coesão residual não for nula, então a superfície de descontinuidade é rugosa ficando com coesão aparente (aparente porque na realidade não há coesão mas sim um oferecer de resistência ao corte por parte da descontinuidade).

Nota: ϕ_d é o ângulo de atrito da superfície da fractura e i é o ângulo da rugosidade

A. Comportamento das descontinuidades planares durante o deslizamento

B. Comportamento das descontinuidades rugosas durante o deslizamento

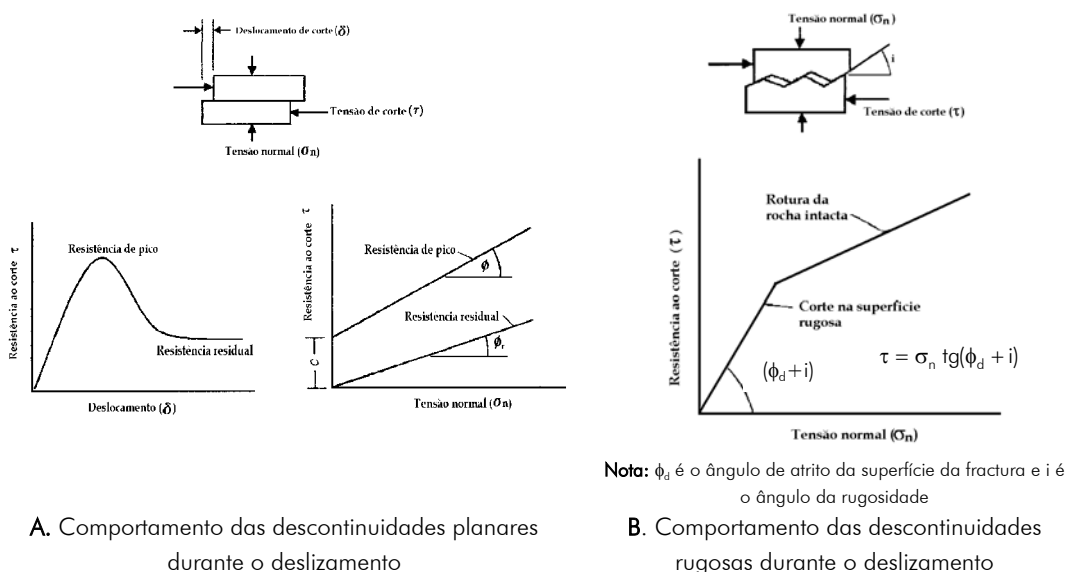



Figura 5.28 – Comportamento das descontinuidades planares e rugosas durante o deslizamento. (adaptado de Hoek, 1998)

5.3.3. ESTUDO DAS DESCONTINUIDADES

As superfícies de descontinuidade existentes nas rochas e nos maciços rochosos são extremamente importantes, uma vez que, geralmente, dão lugar a variações bruscas de propriedades físicas. Estas descontinuidades podem ser microfissuras intragranulares de cristais, contactos intergranulares de cristais e fissuras na matriz rochosa, planos de xistosidade, diaclases, juntas de sedimentação, filões, falhas, etc.

A estabilidade dos maciços rochosos é condicionada, geralmente, pelo excesso de carga e/ou pelo aparecimento de diaclases. A maior parte dos casos de rotura do maciço rochoso é devido ao deslizamento ao longo de superfícies de anisotropia (Rocha, 1981).

Nesta etapa do estudo de caracterização do maciço rochoso devem ser estudadas as descontinuidades sob os aspectos referidos no Quadro 5.16, com o objectivo de atingir os resultados nele indicados.

Quadro 5.16 - Acções a desenvolver e resultados a obter com a realização do estudo das descontinuidades.

ETAPA 1.2 – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA		
ACTIVIDADE	ACÇÕES/MEIOS	RESULTADOS A OBTER
1.2.3. Estudo das Descontinuidades	Levantamento da atitude das descontinuidades (completar levantamento realizado na fase de prospecção geológica, se necessário) Estudo das características das descontinuidades que influenciam o comportamento geomecânico do maciço (espaçamento, continuidade, abertura, rugosidade, preenchimento, condições hidráulicas) Mapeamento das fracturas por observação directa, fotografia ou filmagem.	Definição do posicionamento das descontinuidades e sua divisão em famílias, atendendo à sua atitude. Mapas de fracturação das frentes (2D) e blocos-diagrama (3D) com a representação das descontinuidades do maciço. Caracterização das várias famílias de descontinuidades em termos das suas propriedades de acordo com as recomendações da ISRM.

As superfícies de descontinuidade podem ser classificadas, em termos geomecânicos, do seguinte modo (Mendes, 1985):

a. Superfícies de descontinuidade que, pela sua frequência de ocorrência, pequena dimensão ou pequena variação de propriedades mecânicas, embora influenciando as propriedades do maciço, não impedem o estudo através da mecânica dos meios contínuos (ex. planos de xistosidade, superfícies de descontinuidade ao nível dos cristais, ou juntas de sedimentação entre leitos de rocha idêntica, etc.).

b. Superfícies de descontinuidade que obrigam ao recurso à mecânica dos meios descontínuos para o estudo dos maciços rochosos (ex. diaclases, falhas, etc.), e que são responsáveis pela compartimentação do maciço.

Os maciços rochosos podem ser considerados homogéneos quanto à compartimentação, quando as atitudes médias das suas famílias de fracturas e as correspondentes densidades máximas de compartimentação são aproximadamente constantes ao longo do mesmo. Nos maciços marmóreos de elevada resistência, são as superfícies de descontinuidade que devem ser estudadas, de modo a garantir a sua estabilidade durante a abertura da exploração subterrânea. Para realizar este estudo há necessidade de efectuar uma análise exaustiva das descontinuidades, complementando o trabalho realizado na fase 1.1 (prospecção geológica). Assim, devem ser mapeadas as fracturas (com recurso a fotografias, se necessário) indicando o seu posicionamento e orientação, bem como outras características que, até agora, não tinham assumido muita importância, como é o caso da rugosidade, da abertura, do preenchimento e das condições hidráulicas. De acordo com vários autores, as descontinuidades que compartimentam o maciço rochoso devem ser estudadas utilizando os métodos sugeridos pela ISRM.

5.3.4. MODELO GEOMECÂNICO

5.3.4.1. DEFINIÇÃO

O modelo geomecânico do maciço rochoso deve incluir toda a informação disponível, de modo a traduzir o comportamento do mesmo em termos de resistência e deformabilidade. A correcta definição deste modelo é muito importante para as fases de dimensionamento e planeamento dos desmontes, devendo a sua construção, que pode basear-se num zonamento geotécnico, atender ao modelo geoestrutural definido da fase 1.1 da caracterização do jazigo marmóreo.

Neste modelo devem estar sistematizados todos os dados obtidos relativamente à resistência e deformabilidade dos vários tipos de rochas interessados na abertura da exploração subterrânea, bem como as características do sistema de compartimentação característico do maciço, atendendo às propriedades das descontinuidades estudadas no capítulo 5.3.3. Além disso, deve ser identificado o estado de tensão preexistente do maciço rochoso.

O objectivo principal deste modelo é a identificação de zonas do maciço com comportamentos geomecânicos semelhantes. O grau de certeza dos resultados obtidos será tanto maior quanto mais e melhor informação existir.

5.3.4.2. RESISTÊNCIA DO MACIÇO

Para estudar a resistência de um maciço rochoso é necessário não esquecer que ele é constituído por duas entidades:

1. Rocha
2. Descontinuidades

No caso em que a rocha apresenta elevada resistência, a rotura do maciço é, essencialmente, condicionada pelas características das descontinuidades presentes. Para maciços que possuam até três famílias de descontinuidades é necessário estudar as características da fracturação, quanto à sua resistência ao corte e à sua atitude, pois são elas as principais responsáveis pela rotura do maciço. No caso de maciços com mais de três famílias de descontinuidades, estes podem ser considerados, em alguns casos e para efeitos de cálculos, como homogéneos e isótropos, e neste caso a resistência é dada por valores médios dos parâmetros que caracterizam a resistência do maciço, ou seja, uma coesão média e um ângulo de atrito médio, função da resistência das descontinuidades e da rocha, embora difíceis de determinar, na prática.

Para estudar a rotura das rochas e dos maciços rochosos existem actualmente variados critérios, quer científicos, quer empíricos. Os mais utilizados, presentemente, na mecânica das rochas, são:

- Critério de Mohr – Coulomb (científico)
- Critério de Hoek-Brown (empírico)

O *critério de Mohr-Coulomb* baseia-se em duas propriedades das rochas e dos maciços rochosos, nomeadamente no ângulo de atrito interno e na coesão. De acordo com este critério as rochas rompem por tracção, segundo planos normais à direcção da tensão aplicada, ou por corte, em

planos onde é máxima a diferença entre a tensão de corte e a acção do atrito interno. Postula ainda, este critério, que o atrito interno do material pode variar para a mesma rocha em função da variação da tensão de confinamento. Na figura seguinte apresentam-se as representações gráficas deste critério.

A. Representação da envolvente de Mohr-Coulomb para diferentes estados de tensão

B. Determinação dos parâmetros de resistência da rocha, coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ)

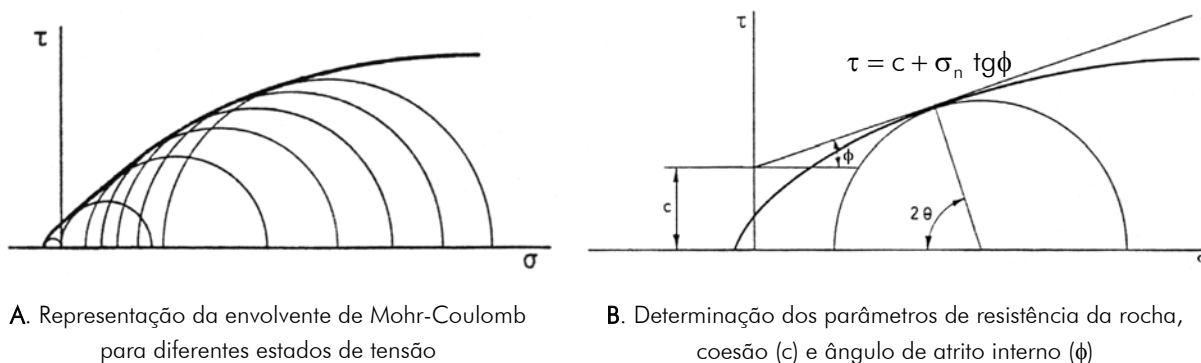



Figura 5.29 – Envolvente de Mohr-Coulomb e parâmetros de resistência da rocha.
(adaptado de Mendes, 1985)

De acordo com esta teoria de rotura todos os estados de tensão que ultrapassam a envolvente originam a rotura do material e, por outro lado, todos os que estiverem abaixo reflectem estabilidade. Junto do eixo do τ e quando não existem elevadas tensões de confinamento, a envolvente de Mohr-Coulomb substitui-se muitas vezes por uma recta com a equação apresentada na Figura 5.29-B (Mendes, 1985).

O *critério de rotura de Hoek-Brown* foi formulado para ser aplicado, no seu caso geral, a maciços fracturados para estimar a sua resistência. Este critério baseia-se no conhecimento das condições de fracturação existentes e nas características das superfícies das descontinuidades que individualizam os blocos (Hoek e Brown, 1980). Este critério é definido pela seguinte expressão geral:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right]^a$$

em que: σ'_1 – tensão efectiva máxima na rotura
σ'_3 – tensão mínima efectiva na rotura
σ_{ci} – resistência à compressão uniaxial da rocha intacta
m_b – valor de Hoek-Brown da constante m para o maciço rochoso
s – constante que depende das características do maciço rochoso
a - constante que depende das características do maciço rochoso

Para amostras de rocha intacta a expressão do critério de Hoek-Brown simplifica-se para:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left[m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1\right]^{0.5}$$ (em que m_i é o valor da constante m de Hoek-Brown para a rocha intacta)

Para estimar a resistência de um maciço rochoso através do critério de Hoek-Brown, é necessário determinar os seguintes parâmetros:

Resistência à compressão uniaxial de um elemento de rocha intacta (σ_{ci}) – este parâmetro pode ser determinado por meio de ensaios de carga pontual, martelo de Schmidt, ou compressão uniaxial simples ou, ainda, através de ensaios de compressão triaxial, devendo ser corrigido se o seu diâmetro não for igual a 50 mm (Hoek e Brown, 1980);

Valor da constante m_i de Hoek-Brown para a rocha intacta – este parâmetro pode ser estimada com base em quadros elaborados por Hoek e Brown (1980), ou através de ensaios de compressão triaxial, cuja metodologia para determinação destes índices se encontra apresentada em pormenor em Hoek (1998);

Valor do GSI ("*Geological Strenght Index*") para o maciço rochosos – é determinado através de quadros elaborados pelos autores (Hoek e Brown, 1980 e Hoek, 1998) e permite estimar os parâmetros m_b, s e a.

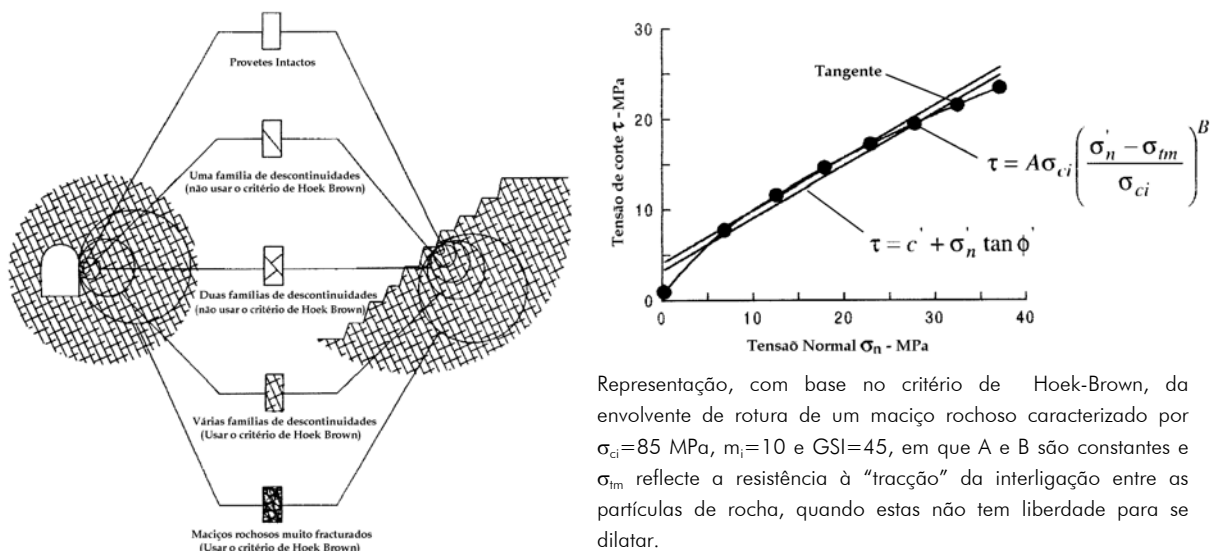
Este critério só deve ser aplicado em determinados casos, tal como se apresenta na Figura 5.30.

Representação, com base no critério de Hoek-Brown, da envolvente de rotura de um maciço rochoso caracterizado por σ_{ci}=85 MPa, m_i=10 e GSI=45, em que A e B são constantes e σ_{tm} reflecte a resistência à "tracção" da interligação entre as partículas de rocha, quando estas não tem liberdade para se dilatar.

Figura 5.30 – Condições de aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown e seus resultados.
(adaptado de Hoek e Brown, 1980)

A utilização de um determinado critério de rotura, para o estudo de um problema, deve satisfazer os seguintes requisitos (Hoek e Brown, 1980):

a. Traduzir adequadamente a resposta de uma amostra de rocha intacta para a faixa de tensões existentes em subterrâneo. Estas gamas de condições vão desde a resistência à tracção até à compressão triaxial.

b. Ser capaz de prever a influência de uma ou mais famílias de descontinuidades sobre o comportamento da amostra de rocha. Este comportamento pode ser altamente anisotrópico, ou seja, vai depender da inclinação das descontinuidades em relação à direcção de aplicação de tensões.

c. Possibilitar a projecção, mesmo que aproximada, do comportamento à escala do maciço rochoso, contendo várias famílias de descontinuidades.

Se um maciço rochoso se encontra compartimentado por superfícies que lhe diminuem a continuidade e que permitem movimentos de reajustamento das posições relativas dos blocos por elas formados, há necessidade de analisar a resistência dessas superfícies de descontinuidade, pois esta condiciona a resistência global do próprio maciço. De acordo com Jaeger (1960), as condições que motivam o deslizamento das diaclases, atendendo à Figura 5.31, podem ser traduzidas pela seguinte inequação:

$$\sigma_1 \geq \sigma_3 + \frac{2(c + \sigma_3 \mathrm{tg}\phi)}{(1 - \mathrm{tg}\phi\ \mathrm{tg}\beta)\,\mathrm{sen}2\beta}$$

em que:
- c – coesão;
- ϕ - ângulo de atrito
- σ_1 – tensão principal máxima
- σ_3 – tensão principal mínima
- β - ângulo que o plano da descontinuidade faz com σ_1

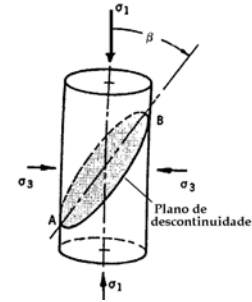



Figura 5.31 – Representação do plano de descontinuidade.
(adaptado de Hoek e Brown, 1980)

A resistência das descontinuidades também pode ser determinada à custa de métodos empíricos, como por exemplo através da aproximação realizada por Patton que foi posteriormente estudada por Barton e seus colaboradores (1990), uma vez que a equação proposta inicialmente, apesar de simples, não traduzia a realidade. Assim, foi proposta a seguinte expressão para determinar a resistência ao corte das descontinuidades (Barton e Bandis, 1990):

$$\tau = \sigma_n\ \mathrm{tg}\left(\phi_r + \mathrm{JRC}\log_{10}\left(\frac{\mathrm{JCS}}{\sigma_n}\right)\right)$$

em que:
- τ - resistência ao corte
- σ_n - tensão normal à superfície da descontinuidade
- ϕ_r - ângulo de atrito residual da descontinuidade
- JRC - coeficiente de rugosidade (determina-se através de ábacos)
- JCS - resistência à compressão uniaxial da parede da descontinuidade (pode-se determinar através do martelo de Schmidt)

O coeficiente JRC pode ser tirado do quadro ou do ábaco da Figura 5.32 de acordo com o seu perfil. O JCS pode ser determinado ensaiando a superfície de descontinuidade com o martelo de Schmidt e entrando com o valor do ressalto (R) no ábaco que relaciona este parâmetro com a resistência à compressão da rocha (σ_c) anteriormente apresentado no capítulo 5.3.1.1 (ver Figura 5.16). Os parâmetros anteriores devem ser corrigidos para o efeito de escala, tendo Barton e Bandis (1982) proposto as seguintes expressões de correcção:

$$\mathrm{JRC}_n = \mathrm{JRC}_0\left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0{,}02\mathrm{JRC}_0} \quad \text{e} \quad \mathrm{JCS}_n = \mathrm{JCS}_0\left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0{,}03\mathrm{JCS}_0}$$

em que:
- JRC_o, JCS_o e L_o - referem-se a uma amostra de laboratório de 100 mm
- JRC_n, JCS_n e L_n - referem-se aos blocos *in situ*

(fonte: Barton e Choubey, 1977, *in* Hoek, 1998) (adaptado de Barton, 1982, *in* Hoek, 1998)

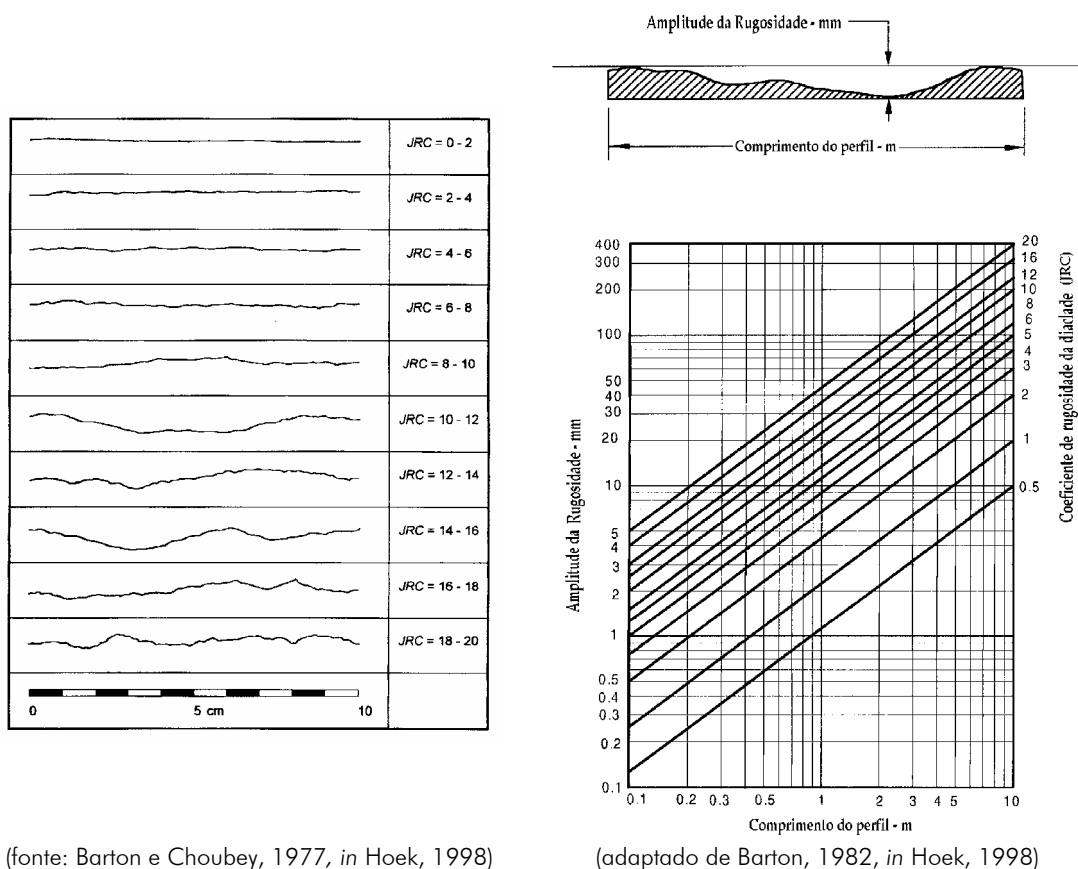



Figura 5.32 – Métodos de determinação do valor de JRC (coeficiente de rugosidade das descontinuidades).

Segundo Barton (1988) o ângulo de atrito de uma descontinuidade pode ser obtido com base na sua rugosidade através da seguinte fórmula:

$$\phi_d = \mathrm{JRC}\ \log_{10}\left[\frac{\mathrm{JCS}}{\sigma_n}\right] + \phi_r$$

em que: ϕ_r – ângulo de atrito residual (depende das características das superfícies da descontinuidade).

Na Figura 5.33 apresenta-se, a título de exemplo, e de acordo com estudos realizados por Hoek e Brown (1980), a variação da resistência das descontinuidades existentes em provetes de rocha em função do número e da sua posição em relação à tensão principal.

Até aqui só se analisaram descontinuidades planas ou rugosas, mas há necessidade de estudar também as diaclases preenchidas com material e/ou com água. Para o primeiro caso, a resistência ao corte pode ser estudada utilizando o valor do ângulo de atrito relativo aos materiais de preenchimento, obtido através de ensaios laboratoriais ou consultando os quadros com valores para materiais de preenchimento específicos, disponíveis na bibliografia. No segundo caso, deve ser tida em consideração a diminuição da tensão normal por efeito da pressão neutra (u) originada pela água, devendo ser utilizada a tensão efectiva ($\sigma_n' = \sigma_n$ - u) em vez de σ_n.

A. Duas fracturas fazendo 90° entre si

B. Três fracturas fazendo 60° entre si

C. Quatro fracturas fazendo 45° entre si

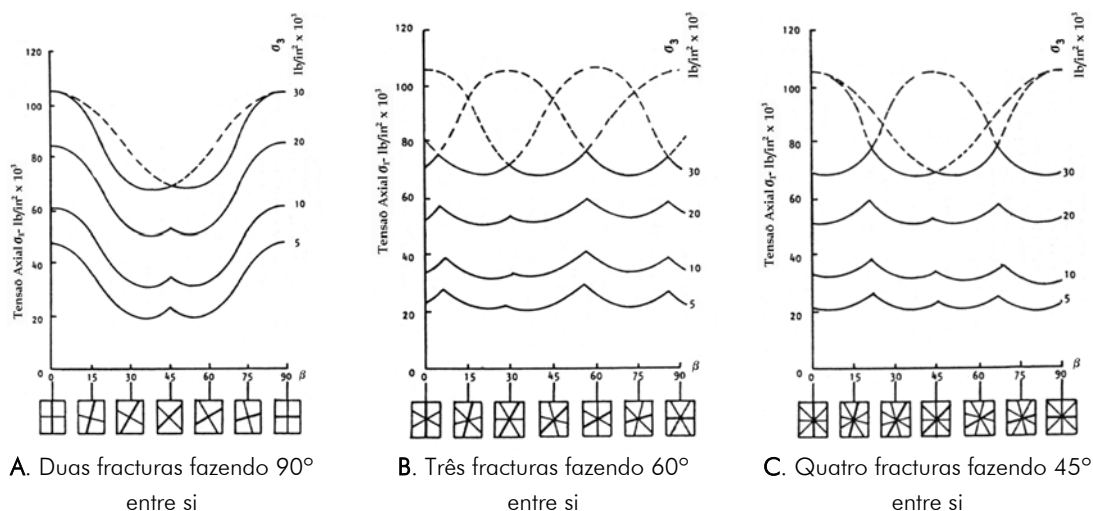



Figura 5.33 – Representação das curvas de resistência de provetes de rocha com múltiplas descontinuidades em função do seu posicionamento em relação à direcção da carga.

(adaptado de Hoek e Brown, 1980)

5.3.4.3. DEFORMABILIDADE DO MACIÇO

A deformabilidade de um maciço rochoso traduz a resposta que este oferece quando solicitado. Essa resposta é função do tipo ou tipos de rocha que o constituem e também das características das descontinuidades existentes.

No caso de um maciço pouco fracturado em que a rocha assume uma grande importância no seu comportamento, o parâmetro que caracteriza a sua deformabilidade denominado módulo de elasticidade do maciço (E_m), assumirá um valor próximo do módulo de elasticidade da rocha (E). Caso contrário, em maciços muito fracturados, em que as descontinuidades apresentam espaçamento reduzido e/ou preenchimento com espessuras elevadas, esta situação já não se verifica, apresentando o maciço valores de E_m bastante inferiores ao da rocha. Os comportamentos geomecânicos característicos dos maciços rochosos podem ser observados na Figura 5.34 através do diagrama tensões-deformações.

A. Comportamento elástico. Comportamento raro, típico de material homogéneo

B. Comportamento frequente que traduz o fecho das diaclases e compactação crescente do material argiloso

C. Comportamento frequente que traduz o fecho das diaclases no caso em que as suas superfícies estão em contacto em pequenas áreas (zonas de esmagamento)

D. Comportamento frequente que traduz o aparecimento de contactos de rocha depois de deformado o material argiloso de preenchimento

Figura 5.34 – Comportamento do maciço rochoso através do diagrama tensões-deformações.

(adaptado de Mendes, 1985)

A deformabilidade do maciço pode ser estudada através de ensaios *in situ*, tais como o ensaio com dilatómetro, utilizado em furos de sondagens, ou o ensaio com macacos planos de grandes área, fazendo rasgos no maciço. Ambos os métodos se baseiam na análise de deformações (deslocamentos) em função da pressão aplicada ao maciço.

Existem ainda outros ensaios que podem ser realizados para determinar o módulo de elasticidade do maciço, embora sejam mais difíceis de realizar e mais caros, como é o caso do ensaio de placa com macacos clássicos, do ensaio em túneis sobre pressão, entre outros.

Outros métodos que, geralmente, são utilizados para estudar a deformabilidade dos maciços rochosos, baseiam-se em ensaios laboratoriais (como o ensaio de compressão uniaxial simples) através do estudo dos diferentes materiais presentes no maciço e assumindo determinados compromissos entre os valores do E determinados para as rochas e o valor de E_m, em função do julgamento efectuado, baseado na informação geomecânica disponível.

De acordo com o comportamento apresentado pelo maciço ou pela rocha, representado pelo diagrama tensões-deformações, é possível determinar o módulo de elasticidade de vários modos mais ou menos conservativos, dependendo da situação em estudo e da confiança em relação aos resultados obtidos, tal como se pode visualizar na figura seguinte.

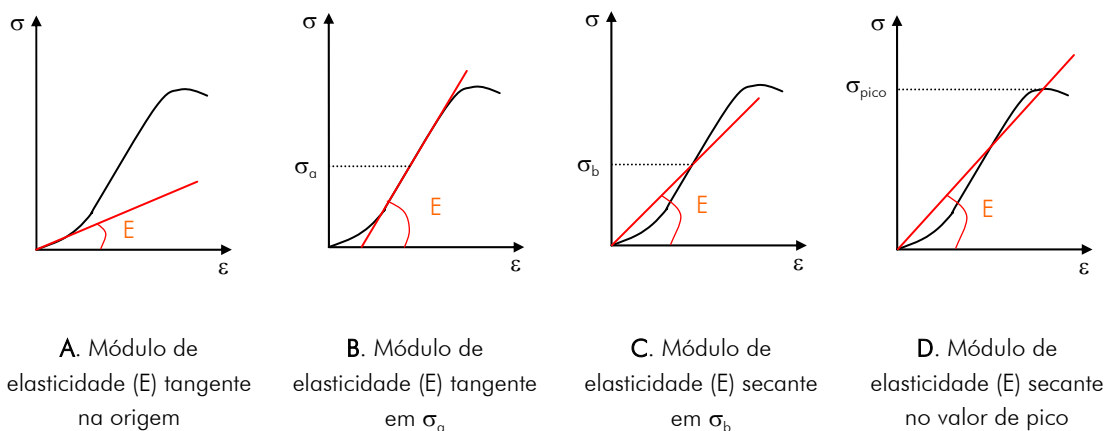



Figura 5.35 – Vários métodos de determinação do módulo de elasticidade com base no diagrama tensões-deformações.

O estudo da deformabilidade dos maciços rochosos pode também ser realizado através de métodos empíricos, sendo os mais aplicados os que se baseiam nas classificações geomecânicas. Estes métodos serão apresentados no capítulo 5.3.4.4.1, quando forem estudadas as classificações geomecânicas de Bieniawski e de Barton.

5.3.4.4. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM REDOR DE CAVIDADES

A criação de vazios nos maciços rochosos, como é o caso das explorações subterrâneas de mármore, impossibilita a transmissão de tensões na zona das cavidades, motivando a

concentração de tensões nos contornos das mesmas. Assim, o estado de tensão é perturbado, podendo as tensões instaladas produzir trabalho, deformando o terreno em torno do vazio. Para estudar o comportamento do maciço rochoso relativamente à abertura de escavações é necessário conhecer os seguintes aspectos:

- Estado de tensão preexistente no terreno;
- Características mecânicas das rochas;
- Características das descontinuidades;
- Forma da escavação.

Para a análise deste problema existem vários métodos de cálculo, que serão objecto de estudo mais detalhado no capítulo 5.3.4.5, nomeadamente: os Métodos Analíticos (clássicos - considera os sólidos infinitos ou semi infinitos, contínuos e puramente elásticos ou elasto-plásticos) e os Métodos Numéricos (para estudo de maciços intensamente compartimentados e pouco comprimidos).

Os métodos analíticos permitem estudar várias situações simples, que se revelam bastante úteis para compreender o comportamento de outras mais complexas, considerando um terreno contínuo, homogéneo e isótropo submetido a um campo de tensões tal que,

$\sigma_z = P$ (tensão vertical)

$\sigma_x = \sigma_y = Q$ (tensão horizontal)

em que: $P = \gamma h$ e $Q = K P$ com: $K = \dfrac{\nu}{1-\nu}$

com: ν- coeficiente de poisson;
K – coeficiente de pressão lateral do terreno em repouso;
γ - peso específico dos terrenos subjacentes;
h – profundidade a que se encontra a galeria.

e para vários estados de tensão: K = 0, estado de tensão axial (terreno desconfinado);
K = 1/3, estado de tensão geoestático ($\nu = 0{,}25$);
K = 1, estado de tensão hidroestático (tensões verticais iguais às horizontais $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$).

Após a abertura da escavação, o estado de tensões preexistente é modificado na periferia da mesma, sendo caracterizado por duas componentes normais: uma radial (σ_r) e uma tangencial (σ_θ). O valor destas componentes de tensão varia com a distância à periferia da escavação. Essa variação pode ser estudada na Figura 5.36, para uma galeria circular e por aplicação da Teoria Matemática da Elasticidade, para o caso de um estado de tensão hidroestático, ou seja, P=Q, admitindo o maciço como homogéneo, isótropo e elástico.

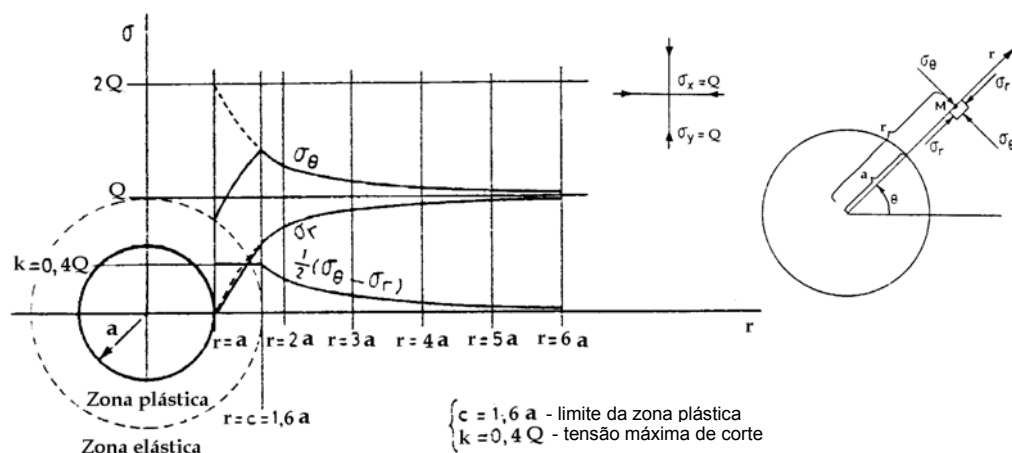



Figura 5.36 – Comportamento das tensões em redor de uma galeria circular.
(adaptado de Mendes, 1985)

Atendendo à figura anterior é possível representar matematicamente as tensões na ***zona elástica***, as quais vêm dadas pelas seguintes expressões:

$$\sigma_\theta = Q\,(1+\frac{a^2}{r^2}) \qquad \text{e} \qquad \sigma_r = Q\,(1-\frac{a^2}{r^2})$$

em que: σ_θ - tensão tangencial
σ_r - tensão radial
a - raio da galeria
r - distância do ponto considerado ao eixo da galeria

Por sua vez, na ***zona plástica,*** as tensões são traduzidas pelas seguintes equações:

$$\sigma_\theta = 2k + \frac{Q-k}{\log\sqrt{\frac{Q}{k}}}\log\frac{r}{a} \qquad \text{e} \qquad \sigma_r = \frac{Q-k}{\log\sqrt{\frac{Q}{k}}}\log\frac{r}{a} \qquad \text{com} \qquad k = Q\,(\frac{a}{c})^2 = \tau_{\theta r\,máx}$$

A espessura da deformação do ***raio plástico*** para o interior da escavação (Δa) pode ser determinada pela seguinte fórmula:

$$\Delta a = \frac{(1+\nu)kc^2}{E\,a} \qquad \text{com} \qquad kc^2 = Qa^2$$

Atendendo ainda à figura anterior constata-se que, para uma distância de 3 vezes o diâmetro (6 vezes o raio) em relação ao eixo da galeria, o estado de tensão não sofre qualquer perturbação devido à abertura da escavação.

Na situação em que não existe rocha fracturada (sem zona plástica) a diferença entre σ_θ e σ_r é máxima na periferia da escavação, ou seja r=a. No caso em que aparece uma zona de rocha fracturada a tensão de corte ($\tau_{\theta r} = (\sigma_\theta - \sigma_r)/2$) é máxima no limite da zona plástica, ou seja, r=c.

O caso da galeria circular, estudado através da Figura 5.36, é característico de grandes profundidades, em zonas de maciços muito comprimidos, em que o coeficiente de Poisson do

terreno apresenta valores próximos 0,5 (valor máximo). Nestas condições, o estado de tensão numa primeira aproximação pode ser considerado hidroestático.

Para um estado de tensão em que Q≠P as fórmulas que regem as tensões radiais (σ_r) e tangenciais (σ_θ) são, para qualquer ponto da rocha circundante da galeria de coordenadas (r,θ), as seguintes:

$$\sigma_\theta = (1+\frac{a^2}{r^2})\frac{P+Q}{2} + (1+3\frac{a^4}{r^4})\frac{P-Q}{2}\cos 2\theta \quad \text{e} \quad \sigma_r = (1-\frac{a^2}{r^2})\left[\frac{P+Q}{2} - \frac{P-Q}{2}(1-3\frac{a^2}{r^2})\cos 2\theta\right]$$

À semelhança do que se analisou anteriormente para o estado de tensão hidroestático, também neste caso a tensão máxima de corte ($\tau_{\theta r}$), quando existe formação da zona plástica (fracturação) em torno da escavação, assume valores máximos no limite da mesma (r=c). A expressão que dá a distância do limite da superfície da zona plástica em relação ao eixo da galeria (c), em função do ângulo θ, é a seguinte:

$$k = (\frac{a}{c})^2\frac{P+Q}{2} + \left[1-2(\frac{a}{c})^2 + 3(\frac{a}{c})^4\right]\frac{P-Q}{2}\cos 2\theta$$

em que:
k - valor da tensão de corte ($\tau_{\theta r} = (\sigma_\theta - \sigma_r)/2$) a partir da qual o terreno na vizinhança da escavação entra em escoamento plástico
c - distância do centro da escavação ao limite da zona plástica
θ - ângulo com a horizontal do ponto a estudar
a - raio da escavação
P - σ_z (tensão vertical)
Q - $\sigma_x = \sigma_y$ (tensões horizontais)

Na Figura 5.37 apresentam-se os contornos da superfície da zona plástica em redor de uma escavação circular de eixo horizontal e raio igual a 3, aberta no terreno caracterizado por um estado de tensão em que P=2 e Q=1, sendo k o valor a partir do qual a rocha rompe dando origem a fracturação (formação da zona plástica). Para diferentes valores de k, iguais a 1, ½ e ↓ é possível analisar a forma e extensão da superfície limite da zona plástica.

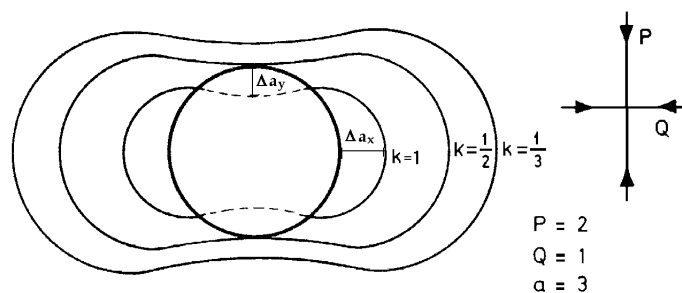



Figura 5.37 – Variação dos raios plásticos em torno de uma galeria circular de raio igual a 3 aberta num terreno em que P=2Q.

(adaptado de Mendes, 1985)

Pode-se constatar que quanto maior for o k, mais dificilmente a rocha cede e, portanto, a zona plástica aparece mais reduzida, expandindo-se para o interior do maciço proporcionalmente com o inverso da resistência apresentada pela rocha (k).

Após a abertura da escavação, mesmo nos casos em que os maciços podem ser considerados como elásticos, as deformações resultantes raramente são instantâneas, sendo sempre necessário um certo tempo até que as dimensões da cavidade estabilizem, normalmente algumas horas ou dias.

O estudo da deformação devido à abertura de uma escavação no interior de um maciço rochoso é, geralmente, complexo. Para isso recorre-se com frequência a métodos numéricos com auxílio de computadores.

Se o maciço a estudar se puder considerar como elástico e nunca abandonar este domínio em qualquer ponto da vizinhança da secção da cavidade, é possível estudar a sua deformação com base na Teoria Matemática da Elasticidade. Segundo os cálculos efectuados por Tincelin (1955) *in* Mendes (1985), os coeficientes de deformação segundo o eixo XX e o eixo ZZ para materiais com diferentes coeficientes de Poisson podem ser observados no Quadro 5.17.

Quadro 5.17 – Coeficientes de deformação horizontal (Cx) e vertical (Cz) em torno de galerias para materiais elásticos com diferentes de coeficientes de Poisson, de acordo com Tincelin.

(fonte: Mendes, 1985)

ν	Cx	Cz
0.000	-1.00	+2.00
0.100	-0.71	+1.83
0.200	-0.40	+1.74
0.250	0.00	+1.62
0.333	+0.55	+1.55
0.400	+0.34	+1.49
0.450	+0.90	+1.48
0.500	+1.50	+1.50

Sinal (+) significa expansão no sentido do vazio

Sinal (-) significa contracção no sentido do maciço

De acordo com o quadro anterior, as deformações totais, podem ser calculadas, segundo os dois eixos XX e ZZ, pelas seguintes fórmulas:

$$\Delta a_x = Cx \; \frac{P\,a}{E}$$

$$\Delta a_y = Cz \; \frac{P\,a}{E}$$

Sendo: P - tensão vertical

E - módulo de elasticidade

a - raio da galeria

Cx e Cz - coeficientes do quadro anterior (Quadro 5.17)

A forma da secção da cavidade é muito importante para a estabilidade do maciço. No caso de uma exploração mineira ela está condicionada por vários factores, tais como:

- Geometria da jazida;
- Dimensão dos equipamentos a instalar;
- Rendimento da exploração;
- Estabilidade e segurança.

As secções circulares são muito estáveis para campos de tensão hidrostáticos ou próximos destes. As secções quadradas também podem ser adoptadas em estados de tensão hidrostáticos, tendo o problema de apresentar elevados valores de tensão tangente nos cantos, o que pode originar roturas, tal como se apresenta na Figura 5.38.

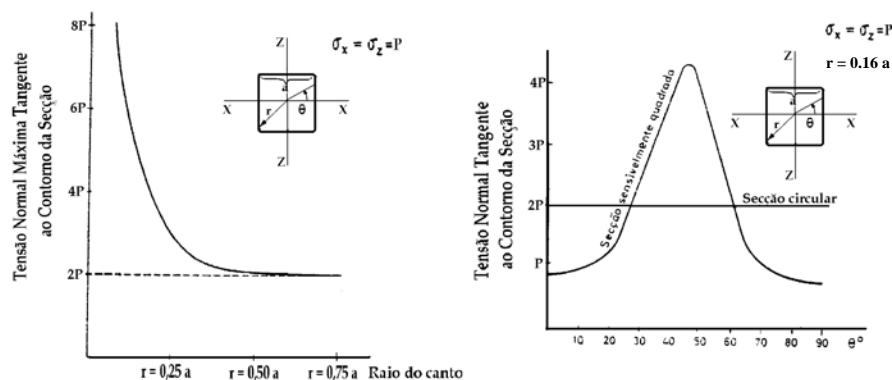



Figura 5.38 – Variação da tensão tangencial no contorno de uma escavação quadrada.

(fonte: Mendes, 1985)

As galerias rectangulares são as mais comuns na indústria extractiva de mármores em subterrâneo, devido, essencialmente, às técnicas de desmonte de rocha e à forma do produto que se pretende obter (blocos paralelepipédicos). As secções rectangulares, à semelhança das quadradas, apresentam também elevada concentração de tensões tangentes nos cantos, o que é desfavorável em terrenos de estabilidade débil. Na Figura 5.39 apresenta-se a distribuição das tensões de secções rectangulares de várias dimensões, considerando o terreno como homogéneo, isótropo e elástico, segundo estudos realizados por Obert, Duvall e Merrill (1960). Nestes estudos foi considerado que os cantos das galerias seriam arredondados, dado que os cantos rectos produzem valores infinitos de tensão.

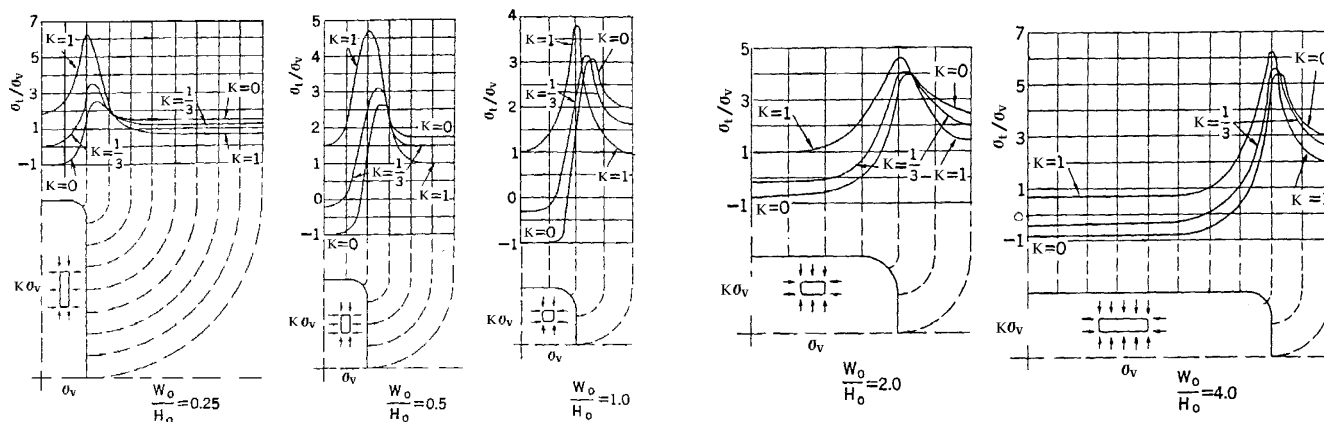



Figura 5.39 – Concentração de tensões (tangenciais) no contorno de cavidades de secção rectangular em função da relação entre a tensão vertical e tensão horizontal.
(adaptado de Obert, Duvall e Merrill, 1960)

As tensões críticas em redor de uma cavidade rectangular inclinada, tal como se mostra na Figura 5.40, pode ser analisada no Quadro 5.18 de acordo com os estudos efectuados por Panek em 1951.

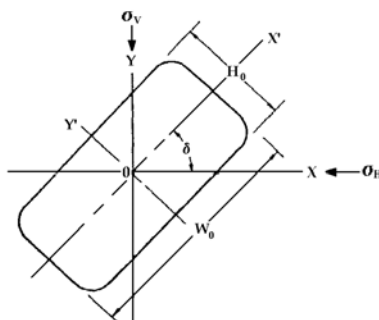



Figura 5.40 – Cavidade rectangular inclinada.
(adaptada de Obert, Duvall e Merrill, 1960)

Quadro 5.18 – Tensões críticas para cavidades rectangulares com cantos arredondados em função do ângulo de inclinação com a horizontal.
(adaptado de Obert, Duvall e Merrill, 1960)

W_0/H_0	δ (º)	$\sigma_{crítico}/\sigma_v$				
		K = 0		K = 1/3		K = 1
		Tracção	Compressão	Tracção	Compressão	Compressão
1	0	-1.0	3.1	-0.3	3.1	3.8
	22.5	-0.5	3.9	(1)	3.8	3.7
	45	-1.1	4.7	(1)	4.3	3.6
	67.5	-1.3	4.0	-0.3	3.9	3.7
	90	-1.0	3.1	-0.3	3.1	3.8
2	0	-0.8	4.0	-0.1	4.1	4.7
	22.5	-0.7	5.0	(1)	4.7	4.6
	45	-1.6	5.7	(1)	5.2	4.5
	67.5	-1.4	4.5	-0.1	4.5	4.6
	90	-1.0	2.7	-0.2	3.1	4.7
3	0	-0.8	4.6	-0.4	4.7	5.2
	22.5	-0.7	5.9	-0.1	5.5	5.2
	45	-1.8	6.5	-0.4	6.0	5.3
	67.5	-1.6	5.0	(1)	5.0	5.2
	90	-1.0	2.6	-0.1	3.3	5.2
4	0	-0.9	5.4	-0.4	5.6	6.2
	22.5	-1.0	6.5	-0.1	6.0	5.9
	45	-2.0	7.1	-0.5	6.6	5.9
	67.5	-1.9	5.5	(1)	5.5	5.9
	90	-1.0	2.5	(1)	3.5	6.2

(1) – Ausência de tensões críticas de tracção.

De acordo com Duvall (1948), *in* Mendes (1985) as secções podem ser hierarquizadas em função da maior estabilidade de acordo com o campo de tensões preexistente, tal como se pode observar na Figura 5.41.

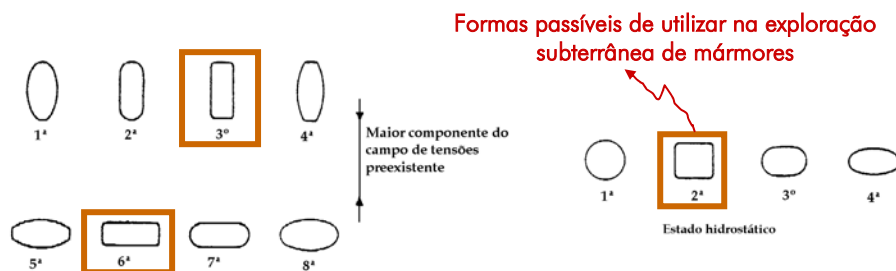



Figura 5.41 – Formas de cavidades hierarquizadas em função da maior estabilidade, indicando as formas a considerar na exploração subterrânea de mármores.
Esquerda: quando P≠Q **Direita**: quando P=Q.
(adaptado de Mendes, 1985)

Como tem sido referido ao longo deste estudo, os maciços rochosos possuem superfícies de descontinuidades que lhes diminuem a resistência (ex. diaclases, falhas, filões, etc.). Estes fenómenos influenciam a distribuição das tensões instaladas no maciço. Nas figuras seguintes é possível observar, para o caso de uma galeria com secção rectangular alongada em que o estado de tensão apresenta P=4 e Q=1, a distribuição das tensões de corte e as trajectórias de tensão perturbadas pela presença de uma descontinuidade (superfície de menor resistência).

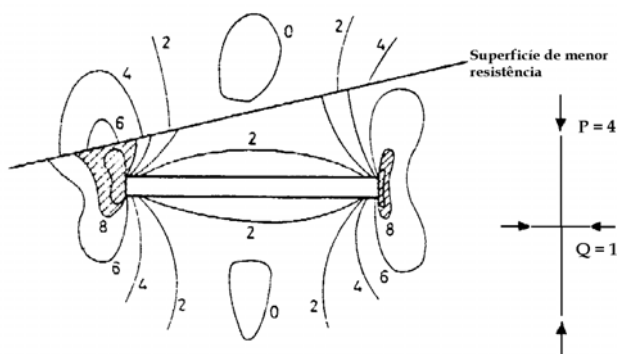



Figura 5.42 – Distribuição das tensões de corte junto de uma cavidade rectangular alongada na presença de uma descontinuidade.
(fonte: Mendes, 1985)

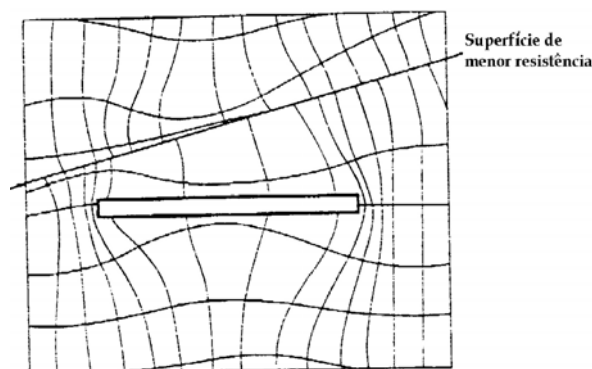



Figura 5.43 – Distribuição das trajectórias de tensão para uma cavidade rectangular alongada na presença de uma descontinuidade.
(fonte: Mendes, 1985)

A abertura de uma escavação num maciço rochoso pode motivar a instalação de um "arco de pressão" que define uma zona aliviada de tensões, na qual o peso do terreno tem possibilidade de se manifestar para o interior da cavidade. A probabilidade de definição de um "arco de pressão" sobre uma escavação reduz-se com a diminuição da relação entre as tensões horizontais e as verticais preexistentes (K = Q/P) e pode ser estimada com base nos seguintes princípios (Mendes, 1985):

K=Q/P diminui ⇒ a probabilidade do "arco de pressão" diminui (ν_{baixo}).

K=Q/P aumenta ⇒ a probabilidade do "arco de pressão" aumenta (ν_{alto}).

Quando existe formação de um "arco de pressão" está-se na presença de condições favoráveis à ocorrência de aluimentos. No estudo destes fenómenos há a considerar dois tipos de aluimentos:

- **Aluimentos internos** – apenas afectam uma altura limitada da exploração;
- **Aluimentos à superfície** – aluimento interno que aumenta e se manifesta à superfície, deformando o terreno consideravelmente (subsidência).

As primeiras manifestações dos aluimentos costumam ser as convergências tecto-piso das cavidades, reforçando a importância da instrumentação na previsão destes fenómenos. Por sua vez, o avanço dos desmontes e respectivo aumento da área da escavação, pode contribuir para que um aluimento interno aumente e se manifeste à superfície, constituindo um aluimento de superfície.

No caso de maciços estratificados pode acontecer que o tecto comece a flectir e os estratos sobrejacentes se separem uns dos outros, formando um arco de pressões, tal como se pode observar na Figura 5.44.

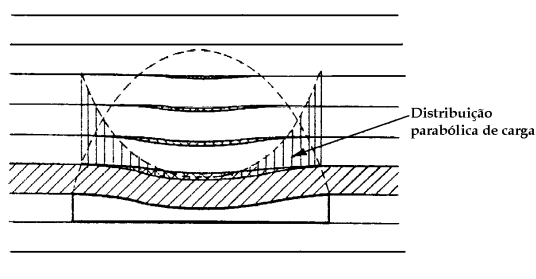



Figura 5.44 – Arco de pressão que se pode formar num maciço estratificado.
(fonte: Mendes, 1985)

A figura anterior mostra que à medida que se vai definindo a separação física dos estratos do tecto, o peso do terreno sobrejacente vai sendo transferido para a rocha virgem em torno dos extremos da cavidade. Isto, incrementará as tensões de corte instaladas, podendo levar à ruína da escavação.

No que diz respeito à exploração subterrânea de mármores, há a possibilidade de ocorrência de aluimentos à superfície, em forma de chaminé, se não existir um adequado dimensionamento dos desmontes em função da caracterização geológico-geomecânica do maciço e da sua compartimentação. Estes fenómenos podem ocorrer se existirem sistemas de diaclasamento favorável, tais como a presença de falhas verticais ou de filões, ou outros fenómenos que promovam o deslocamento de parte do material sobrejacente à escavação para o seu interior.

5.3.4.4.1. Classificações Geomecânicas

A utilização de classificações geomecânicas tem por objectivo classificar o maciço rochoso, no que respeita ao seu comportamento geomecânico, em função de um determinado conjunto de parâmetros. A utilização desta ferramenta deve ser realizada com cuidado e aplicada correctamente, exigindo conhecimento e experiência por parte de quem aplica.

As classificações podem ser utilizadas, fundamentalmente, em fases preliminares do estudo de caracterização do maciço rochoso, necessárias à abertura da exploração. O principal objectivo

das classificações existentes é permitir estudar a resistência do maciço rochoso e a sua deformabilidade e, ao mesmo tempo, determinar a necessidade de suporte a utilizar com vista à manutenção da estabilidade das cavidades, tendo em conta as características dos trabalhos a efectuar no mesmo.

A classificação dos maciços rochosos sofreu, ao longo dos últimos cem anos, vários desenvolvimentos. A maior parte destas alterações foi desenvolvida para situações relacionadas com a engenharia civil (obras subterrâneas).

De entre as classificações existentes, aplicáveis a maciços rochosos, destacam-se as classificações geomecânicas de Bieniawski (1976) e a do NGI ("*Norwegian Geotechnical Institute*") ou de Barton (1974), por serem as mais utilizadas actualmente, as quais têm vindo a ser refinadas com o passar dos anos, nomeadamente através da experiência acumulada.

5.3.4.4.2. Classificação de Bieniawski

A classificação de Bieniawski, publicada em 1976, intitulada "*Rock Mass Rating*" (RMR) assenta em seis parâmetros, a partir dos quais se determina o valor do RMR característico do maciço rochoso. Esses parâmetros são os seguintes:

1. Resistência à compressão;
2. *Rock Quality Designation* (RQD);
3. Espaçamento entre descontinuidades;
4. Características das descontinuidades;
5. Condições hidrogeológicas;
6. Orientação das descontinuidades.

Para classificar o maciço rochoso de acordo com esta classificação geomecânica basta ter disponíveis dados sobre os parâmetros anteriormente apresentados e determinar através da classificação o valor de RMR.

Com base no valor de RMR determinado é possível classificar o maciço quanto à sua qualidade geomecânica e estudar os seus parâmetros de resistência, estimar o seu módulo de deformabilidade e analisar o sustimento necessário para suportar a cavidade. O módulo de elasticidade do maciço (E_m) pode ser estimado, em função do valor de RMR, através das seguintes expressões:

$$E_m = 2\ RMR - 100 \qquad \text{(Bieniawski, 1978)}$$

$$E_m = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)} \qquad \text{(Serafim e Pereira, 1983)}$$

Com base nesta classificação, e utilizando o valor de RMR calculado, é possível determinar os valores dos parâmetros m e s do critério de rotura de Hoek-Brown, apresentado anteriormente no capítulo 5.3.4.2.

As fórmulas a utilizar para essa determinação, são as seguintes (Hoek, 1985, *in* Bieniawski, 1987):

$$m = m_i \, e^{\left(\frac{RMR-95}{13.4}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{RMR-100}{6.3}\right)}$$

Esta classificação pode ser aplicada numa fase preliminar do estudo do maciço rochoso e do dimensionamento dos desmontes, permitindo comparar os resultados obtidos com outros métodos de análise que serão apresentados adiante (capítulo 6.2.2).

5.3.4.4.3. Classificação Barton ou de NGI

A classificação de Barton *et al.*, também conhecida como NGI *("Norwegian Geotechnical Institute")*, foi apresentada em 1974 e propõe a determinação das características dos maciços rochosos com base no calculo do índice Q ("*Rock Tunnelling Quality Index*") que é dado pela seguinte fórmula:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

em que :

$\frac{RQD}{J_n}$ - representa a estrutura do maciço rochosos quanto à blocometria (J_n – grau de fracturação do maciço);

$\frac{J_r}{J_a}$ - representa a rugosidade e as características de atrito das paredes das descontinuidades ou dos seus materiais de enchimento (J_r - estado das descontinuidades segundo a rugosidade; J_a – grau de alteração e preenchimento das descontinuidades);

$\frac{J_w}{SRF}$ - representa a "tensão actuante", sendo um factor empírico complexo (J_w – condições hidrogeológicas; SRF – *Stress Reduction Factor*).

Conhecendo os vários parâmetros característicos do maciço rochoso, anteriormente apresentados, é possível estimar o valor do índice Q, o qual permite analisar a estabilidade da escavação e definir o tipo de suporte a utilizar com vista a evitar situações de instabilidade. Para dimensionar os tipo de suporte a utilizar, será necessário determinar um outro parâmetro, D_e, ("*Equivalent Dimensions"*) que é dado por:

$$D_e = \frac{\text{Vão da Escavação, Diâmetro ou Altura (m)}}{\text{ESR (Excavation Support Ratio)}} \quad [m]$$

O ESR pode ser determinado através desta classificação, com base no tipo e função da galeria (para o caso das cavidades para exploração de mármore, ou seja, cavidades mineiras permanentes, o valor de ESR é de 1.6).

Com base nesta classificação, Barton e os seus colaboradores estabeleceram as expressões que permitem calcular o comprimento adequado das ancoragens (L) a aplicar e o máximo vão que não necessita de suporte. Essas expressões são as seguintes (Barton *et al.*, 1980, *in* Hoek, 1998):

$$L = \frac{2 + 0{,}15B}{ESR} \qquad \text{e} \qquad \text{Máximo vão}_{\text{ sem suporte}} = 2\ ESR\ Q^{\ 0{,}4}$$

em que: L – comprimento da ancoragem
B – Vão da cavidade
ESR – Para as cavidades marmóreas assume o valor de 1.6

Segundo Grimstad e Barton (1993), *in* Hoek (1998), a pressão permanente do tecto no suporte pode ser estudada pela seguinte fórmula:

$$P_{\text{ tecto}} = \frac{2\sqrt{J_n}\ Q^{-\frac{1}{3}}}{3J_r}$$

Por sua vez o módulo de elasticidade do maciço rochoso (E_m) pode ser estimado, empiricamente, através desta classificação, com base na expressão avançada por Barton *et al.* (1980), *in* Hoek (1998):

$$E_m = 25 \log_{10} Q$$

Comparando as fórmulas de cálculo de E_m dadas pelas classificações de Bieniawski e de Barton, é possível observar, através do gráfico da Figura 5.45, o comportamento de cada uma delas.

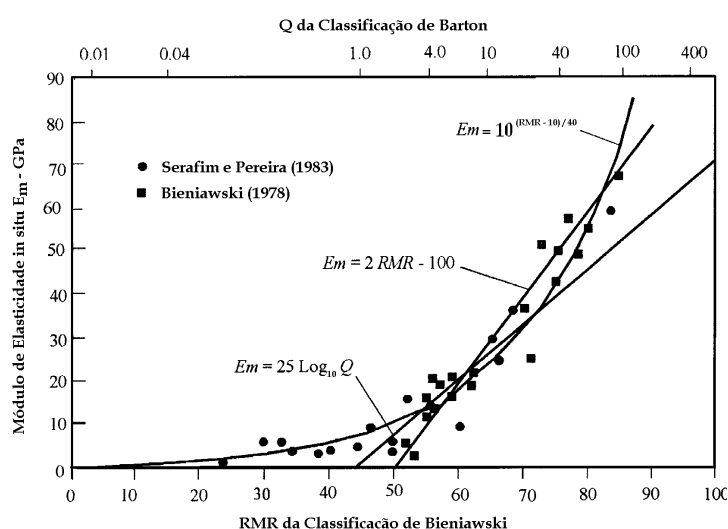



Figura 5.45 – Previsão do módulo de elasticidade do maciço rochoso com base nas fórmulas de cálculo dadas pelas classificações geomecânicas.

(adaptado de Hoek, Kaiser e Bawden, 1998)

5.3.4.4.4. *Comparação entre as duas Classificações*

Segundo Hoek (1998), as classificações de Bieniawski e Barton *et al.* incorporam dados geológicos, geométricos e parâmetros de engenharia, chegando a um valor quantitativo para a qualidade do maciço rochoso. A diferença entre as duas classificações reside no facto de utilizarem diferentes parâmetros e de atribuírem pesos diferentes para parâmetros idênticos.

Comparando as classificações de Bieniawski e a classificação de Barton, verifica-se que Bieniawski dá uma maior ênfase à orientação e inclinação das descontinuidades enquanto que Barton *et al.* não engloba a orientação das fracturas, mas sim a sua rugosidade e alteração, propriedades estas que estão associadas à resistência ao corte do maciço rochoso.

As classificações geomecânicas possibilitam uma aproximação empírica, relativamente ao suporte e às características do maciço, as quais devem ser alvo de críticas por parte dos engenheiros, de acordo com a informação geológica disponível. Segundo Celada Tamames (1997) estas aproximações possuem algumas deficiências das quais se destacam:

- Não permitem a quantificação dos coeficientes de segurança do sustimento;
- Não consideram o efeito da forma da galeria;
- Não quantificam o efeito na envolvente motivada pela escavação, como a subsidência e a alteração do estado de tensão.

Na indústria extractiva subterrânea de rochas ornamentais, estas classificações podem ser utilizadas para classificar o maciço do ponto de vista geomecânico e averiguar sobre a estabilidade das galerias a criar. Os resultados deverão ser utilizados como uma primeira abordagem recorrendo, posteriormente, a métodos de cálculo analíticos e a programas computacionais de análise numérica, que permitem verificar a adequabilidade da solução estudada e a sua optimização.

Segundo Hoek e Brown (1980), ambas as classificações apresentadas são simples e de extrema utilidade para a tomada de decisão, embora a classificação de Bieniawski não deva ser utilizada para maciços rochosos muito fracos, alterados e comprimidos, uma vez que é difícil de aplicar. Nestes casos deve ser utilizada a classificação de Barton.

No caso das explorações de mármores no Anticlinal de Estremoz, qualquer uma delas pode ser utilizada, embora a classificação de Bieniawski possa ser mais adequada uma vez que foi desenvolvida para túneis escavados próximos da superfície e em maciços rochosos com descontinuidades, constituídos por rochas duras, o que se assemelha às características das explorações subterrâneas a realizar nos mármores do Alentejo.

A relação entre o RMR e Q foi estudada por Bieniawski em 1976 e, segundo este autor, vem dada por:

$$RMR = 9 \log_e Q + 44$$

Com esta expressão é possível comparar os valores de Q da classificação de Barton e os resultados obtidos através da mesma, com a classificação de Bieniawski. Esta comparação poderá permitir uma melhor definição da qualidade do maciço rochoso e das suas características de resistência e deformabilidade e, consequentemente, da necessidade de suporte a utilizar.

5.3.4.5. MÉTODOS DE CÁLCULO

Existem, hoje em dia, vários métodos de cálculo, como aliás já foi mencionado ao longo deste estudo, cada um com as suas características específicas e assumindo uma série de simplificações. Este facto faz com que a análise resultante da sua aplicação seja sempre aproximada, devendo o utilizador do método estar consciente desta situação com vista à obtenção de resultados representativos. Os métodos de cálculo podem ser divididos em dois grandes grupos:

1. *Métodos analíticos*

    - Formulação Elástica
    - Método das curvas características

2. *Métodos numéricos*

    - Método dos elementos finitos
    - Método das diferenças finitas
    - Método dos elementos fronteira
    - Método dos elementos discretos

Para se conseguir uma análise fundamentada, é necessário possuir uma boa caracterização do maciço rochoso, nomeadamente em termos do material rochoso que o constitui e, acima de tudo, através da definição da sua compartimentação. Ora, esta tarefa, nem sempre é fácil, podendo mesmo ser irrealizável dadas as heterogeneidades que os maciços rochosos apresentam.

5.3.4.5.1. Métodos Analíticos

No ***método de formulação elástica*** utilizam-se as expressões da Teoria Matemática da Elasticidade, admitindo as seguintes simplificações:

- A cavidade tem uma forma circular sem revestimento;
- O terreno é considerado, para efeito de cálculo, como contínuo, homogéneo e isótropo;
- O problema é analisado bidimensionalmente.

O estudo das tensões em redor de uma galeria circular, através deste método, utiliza as fórmulas apresentadas anteriormente no capítulo 5.3.4.4. Com essas equações, é possível determinar a magnitude das tensões e deformações que irão ocorrer após a abertura da cavidade, bem como a sua distribuição na periferia da escavação.

Este método teórico só permite tirar conclusões qualitativas, devido aos enormes problemas que encontra para validar a sua aplicação, embora apresente a vantagem de conseguir explicar,

cientificamente, determinadas situações, o que permite avanços importantes em relação ao empirismo que ainda norteia muitas decisões (Mendes, 1985).

Por sua vez, o ***método das curvas características,*** permite analisar o comportamento, através do estudo das tensões-deformações, da superfície do volume escavado e do sustimento aplicado na massa rochosa. As hipóteses de partida do método de curvas características são as seguintes (Geoconsult, 1995):

- Considera-se uma secção plana do problema, supondo um comportamento com simetria cilíndrica, em deformação plana;
- A cavidade é considerada circular com sustimento colocado em torno do seu contorno;
- O terreno é contínuo, homogéneo e isótropo, sendo o estado de tensões também isótropo, com uma tensão inicial igual a σ_i;
- Para o terreno em estudo são válidos os seguintes critérios de rotura: elástico, elastoplástico perfeito, elastoplástico frágil e meio puramente coesivo ($\phi = 0$);
- Para os sustimentos são válidos todos, ou alguns, dos seguintes elementos: anel de betão projectado, ancoragens, cabos, pregagens e redes metálicas.

A base do método consiste em representar a curva de convergência do terreno e a curva de confinamento do sustimento, no mesmo diagrama de σ_r (tensão radial) em função de δ_r (deformação do contorno), tal como se mostra na Figura 5.46.

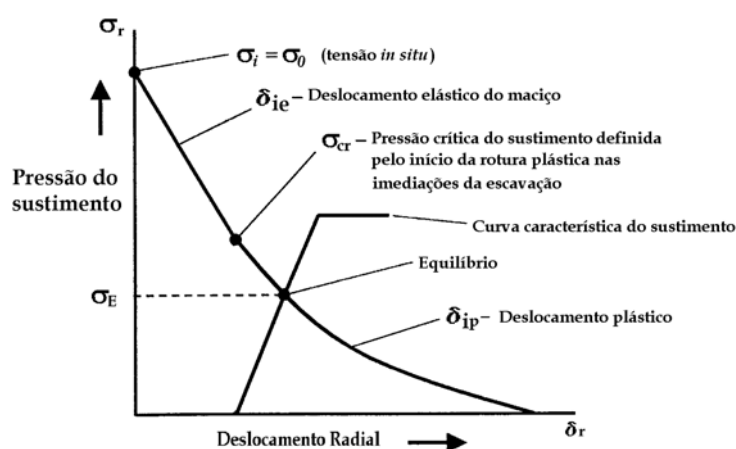



Figura 5.46 – Modelação das curvas de resposta do terreno e do suporte para uma escavação.
(adaptado de Hoek, 1998)

Os vários parâmetros intervenientes neste método de cálculo (deslocamento elástico, deslocamento plástico, pressão interna crítica, etc.) podem ser determinados com base em equações. Estas não serão estudadas neste trabalho, em virtude deste método não ter aplicação directa no estudo de explorações subterrâneas de mármore. Contudo, apresenta-se as principais conclusões a tirar deste método (Geoconsult, 1995):

- O maciço rochoso é autoportante e por isso a sua curva característica atinge o eixo dos deslocamentos radiais (δ_r);
- O maciço não é autoportante e necessita de elementos de sustimento (a sua curva característica não atinge o eixo de δ_r);

- O sustimento sé funciona se for atingido o ponto de equilíbrio (se as curvas características do sustimento e do maciço se interceptarem);
- A aplicação de sustimento deve ser realizado de modo a aproveitar ao máximo a capacidade de auto-sustimento da rocha;
- No caso de explorações de rochas ornamentais, onde é penalizante o aparecimento de fracturação induzida na periferia da cavidade, o ponto de equilíbrio deve ser atingido dentro da fase elástica da curva característica do maciço rochoso.

Este método de cálculo apresenta limitações importantes que se prendem com o facto de ser difícil o estudo de secções não circulares, o que reduz o seu campo de aplicação na exploração subterrânea de mármores, na qual as cavidades assumem, regra geral, formas rectangulares.

5.3.4.5.2. Métodos Numéricos

Com o aparecimento dos computadores, o tratamento de problemas mais complexos e com elevado volume de dados foi facilitado e o tempo de estudo reduzido. Foi assim possível começar a utilizar os métodos de análise numérica (Método dos elementos finitos, Método dos elementos fronteira, Método das diferenças finitas, Método dos elementos discretos, etc.) no dimensionamento e estudo do comportamento dos desmontes.

Apesar da indiscutível utilidade dos computadores, a sua aplicação a casos mineiros, nomeadamente à geomecânica, deve ser realizada com cuidado, devendo interpretar-se os resultados do processamento por computador e ter uma capacidade crítica quanto à sua validade relativamente à realidade em estudo. Esta preocupação é fundamental, uma vez que se está trabalhar com maciços rochosos, os quais só muito raramente podem ser considerados como homogéneos, contínuos e isótropos.

Segundo Hoek (1998), os métodos de análise numérica anteriormente apresentados no capítulo 5.3.4.5, podem ser divididos em dois grupos:

A. Métodos de fronteira;
B. Métodos de domínio.

A. Métodos Fronteira

Nestes métodos só a fronteira da escavação é dividida em elementos, sendo o interior do maciço rochoso representado matematicamente como infinito e contínuo. O nome do método de elementos fronteira deriva do facto de só a fronteira do problema ser dividida em elementos (ex. superfície da escavação, superfície de descontinuidade, interfaces de materiais, etc.).

B. Métodos de domínio

Nestes casos, o interior do maciço rochoso é dividido em elementos de geometria simples, cada um com as suas propriedades. O comportamento colectivo e de interacção entre esses elementos simples, permite estudar o comportamento do maciço rochoso representado pelos mesmos. O

método dos elementos finitos e das diferenças finitas, são técnicas de domínio que tratam o maciço rochoso como contínuo. O método dos elementos finitos e das diferenças finitas, regra geral, não se conseguem distinguir (Hoek, 1998). Estes métodos são muito bons para estudar materiais heterogéneos e não lineares, uma vez que cada elemento criado responde de acordo com as propriedades do material que representa. O método dos elementos discretos é também um método de domínio, mas, no entanto, trata cada bloco de rocha como um elemento único. Relativamente a este método ainda não existe uma grande experiência acumulada, pelo que será necessário adquirir maior conhecimento sobre os seus campos de aplicação (Hoek, 1998).

Estas duas classes de análise podem ser combinadas para darem origem a modelos híbridos, capazes de minimizar as desvantagens e maximizar as vantagens de cada método.

As grandes diferenças existentes entre os métodos de domínio e os métodos de fronteira são as que constam do Quadro 5.19.

Quadro 5.19 - Principais diferenças entre os métodos de análise numérica de fronteira e de domínio.

(baseado em Hoek, 1998)

MÉTODOS DE DOMÍNIO	MÉTODOS FRONTEIRA
Divisão do maciço em elementos	Discretização somente da fronteira da escavação
As fronteiras do problema tem que ser consideradas longe da escavação devido à geração de resultados erráticos	Considera o maciço rochosos como infinito e contínuo
O operador necessita de alguma experiência	Experiência do operador reduzida
Permite incorporar as propriedades mecânicas do maciço rochoso e das descontinuidades que o compartimentam	Não permite incorporar algumas propriedades do maciço
Faz a modelação de sustimentos aplicáveis ao maciço	Não permite realizar análises com sustimentos aplicados
Conclusão: mais completo	**Conclusão:** mais simples

Dos métodos de análise numérica referidos, o **método dos elementos finitos** (FEM – *Finit Elements Method*) é actualmente o mais utilizado na análise da estabilidade de escavações subterrâneas. As fases de aplicação do FEM para o estudo do comportamento do maciço rochoso envolvido na abertura de uma cavidade mineira, são as seguintes (adaptado de Geoconsult, 1995):

A – Criação do modelo

- Pode ser efectuado em 3D ou 2D, sendo o 3D muito complexo e o 2D fácil de utilizar e interpretar;
- Criação da malha, que deve atender aos seguintes aspectos:
  - Os elementos devem ser tanto menores quanto maior se preveja a variação de tensões e deslocamentos em cada zona;
  - Os elementos devem ser o mais regular possível;

- O tamanho da malha deve ser tal, que existam duas a três vezes a dimensão da cavidade em torno da mesma;
- Podem utilizar-se simetrias para simplificar o estudo.

B –Introdução dos dados

- As cargas actuantes são o peso do terreno ou outras que se detectem no local em estudo;
- Dentro das fases de estudo, deve ser considerada uma fase 0 que representa as condições do terreno antes da abertura da escavação;
- As características da rocha são introduzidas com base nos valores obtidos em ensaios laboratoriais;
- O critério de rotura a utilizar deve ser escolhido em função do tipo de terreno (modelo elástico, elastoplástico ou visco-plástico);

C – Obtenção dos resultados

- Os resultados a obter são do tipo:
  - Distribuição de tensões principais, de corte e outras;
  - Distribuição dos factores de resistência;
  - Análise dos deslocamentos internos e nos contornos da escavação;
  - Localização de pontos de rotura.
- Os resultados devem ser apresentados em gráficos, em tabelas e/ou mais frequentemente em perfis semelhantes aos apresentados na Figura 5.47.

A. Modelo com a análise da distribuição das tensões de corte máximas

B. Modelo com a análise dos deslocamentos totais e da deformação expectável nos contornos da escavação

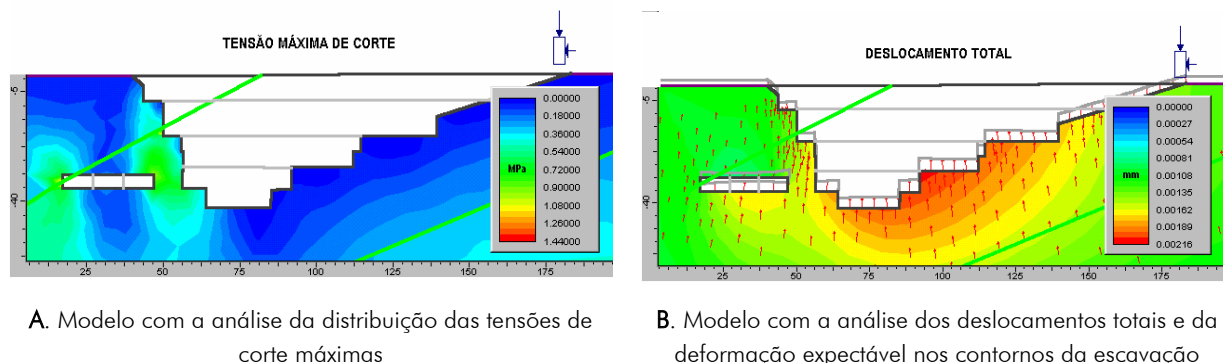



Figura 5.47 – Resultados gráficos exemplificativos da aplicação do método dos elementos finitos ao estudo de uma galeria subterrânea para extracção de mármores, iniciada a partir de uma exploração a céu aberto.

O método dos elementos fronteira (BEM - *Boundary Elements Method*) pode ser combinado com o FEM para estudar o comportamento do terreno em função das fases de escavação de uma cavidade. O FEM permite estudar a zona junto do contorno da cavidade (e o sustimento) e o BEM é utilizado para a análise da zona mais afastada do contorno da cavidade (regime elástico). Esta associação e estudo através de dois métodos numéricos, permite simplificar os cálculos efectuados unicamente com o FEM. Na figura seguinte apresenta-se o tipo de resultados a obter com o BEM.

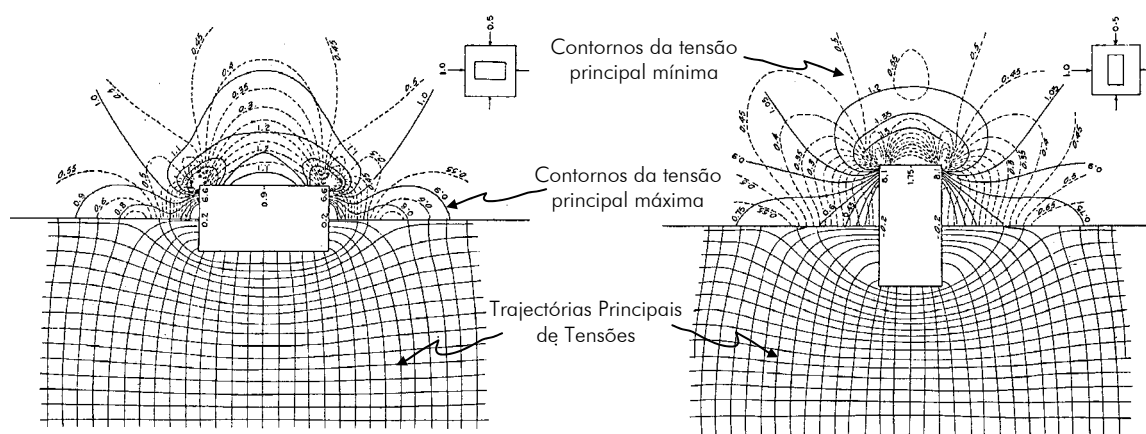



Figura 5.48 - Tensões e deformações em torno de escavações rectangulares estudadas através do método dos elementos fronteira.

(fonte: Hoek e Brown, 1980)

Com o **método dos elementos discretos,** o terreno é modelado por meio de blocos que se encontram em contacto uns com os outros, representando o maciço rochoso compartimentado pelas várias famílias de fracturas. Os blocos podem ser rígidos ou deformáveis e, para cada incremento de tempo, podem obter-se deslocamentos, velocidades e acelerações dos mesmos. Os parâmetros fundamentais deste método são o ângulo de atrito e a coesão, que caracterizam a resistência ao corte das diaclases. Este método exige uma grande potência do cálculo e só modeliza adequadamente os maciços rochosos formados por rochas de boa qualidade e compartimentado por diaclases bem definidas. Na Figura 5.49 apresentam-se modelações realizadas com este método.

A. Trajectórias de tensões B. Deslocamentos dos blocos

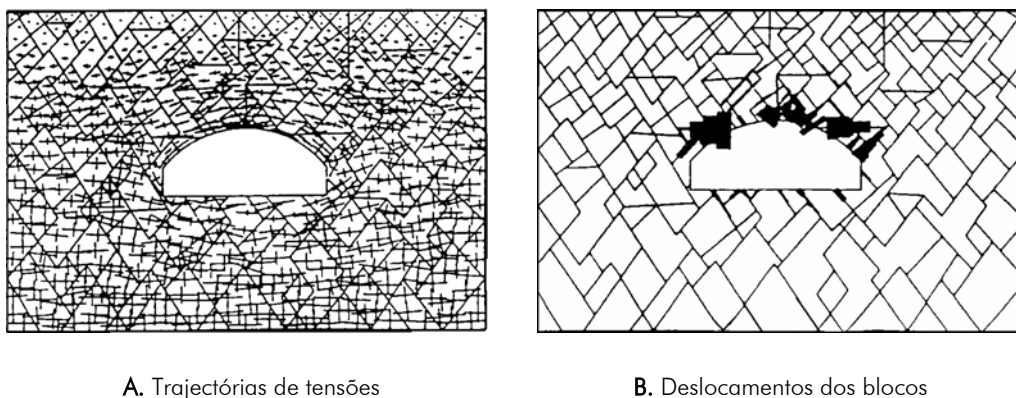



Figura 5.49 – Método dos elementos discretos.

(fonte: Geoconsult, 1995)

A utilização dos métodos de análise numérica é extremamente útil e indispensável para complementar o estudo realizado com base nas classificações geomecânicas (empíricas) e com os cálculos analíticos, no sentido de os validar e de os optimizar no que respeita à geometria das galerias, dos métodos de sustimento a utilizar, etc. No caso de exploração subterrânea de mármores no Anticlinal de Estremoz – Borba – Vila Viçosa, como a experiência acumulada é ainda praticamente nula, torna-se obrigatório o recurso a este tipo de método de análise durante a fase de projecto e mesmo depois dos trabalhos se iniciarem, de modo a garantir a estabilidade do

maciço e, consequentemente, a segurança dos trabalhos. A este nível podem ser realizadas simulações para várias geometrias de desmontes, no sentido de avaliar o seu desempenho relativamente à preservação da blocometria do recurso marmóreo, evitando o aparecimento de pontos de rotura que podem alterar a viabilidade económica da pedreira.

5.3.4.6. ZONAMENTO GEOTÉCNICO

O zonamento geotécnico tem como finalidade a definição de zonas do maciço com idênticas respostas geotécnicas a curto e a longo prazo (Oliveira, 1986a). Esta técnica tem sido muito utilizada nos projectos de construção de túneis e pode também ser útil no dimensionamento de desmontes de rochas ornamentais em subterrâneo. A sua aplicação ao caso da exploração subterrânea de mármores irá permitir, quando confrontada com o zonamento ornamental (zonas com interesse do ponto de vista ornamental), definir zonas com características ornamental-geotécnicas idênticas que poderão ser classificadas quanto à sua explorabilidade, permitindo um adequado desenho e dimensionamento dos desmontes. A utilização desta técnica exige a disponibilização de informação mais ou menos pormenorizada da geologia e da caracterização geomecânica do maciço. A integração destes dados, numa base espacial, permite atingir os objectivos desta metodologia, cujos resultados poderão ser alvo de actualização à medida que se vai recolhendo mais informação, através da prospecção contínua que deverá ser efectuada durante o avanço dos trabalhos de exploração. Na elaboração do zonamento deve tentar-se representar as características do maciço rochoso, através do menor número de zonas geotécnicas possíveis, de modo a não tornar complexa a interpretação e a sobreposição destas com o zonamento ornamental. No Figura 5.50 apresentam-se, de um modo não exaustivo, os parâmetros que podem ser utilizados para definir as zonas geotécnicas, bem como um exemplo de zonamento geotécnico bidimensional (2D).

PARÂMETROS

- Litologias
- Rede de fracturação e características das descontinuidades (orientação, espaçamento, continuidade, etc.)
- Grau de alteração
- Condições de percolação
- Propriedades geomecânicas da rocha
    - Módulo de elasticidade (E)
    - Resistência à compressão (σ_c)
    - Resistência à tracção (σ_t)
    - Coeficiente de Poisson (ν)
    - Coesão (c)
    - Ângulo de atrito interno (ϕ)
- Propriedades geomecânicas das descontinuidades:
    - Coesão (c_d)
    - Ângulo de atrito (ϕ_d)

ZONAMENTO GEOTÉCNICO

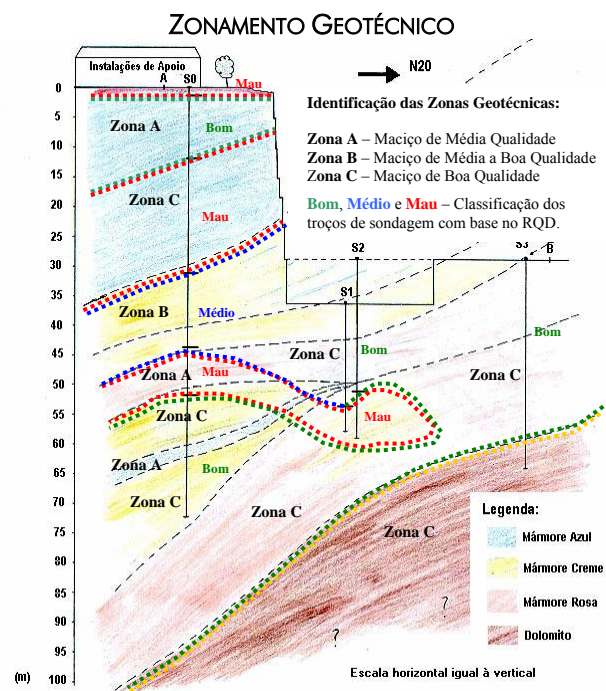



Figura 5.50 - Características e parâmetros utilizados para definir as zonas geotécnicas.

No exemplo de zonamento apresentado na figura anterior, é possível verificar que as zonas com comportamento geotécnico idêntico são definidas em função da litologia e da rede de fracturação existente no maciço. Identificando, numa primeira fase, os limites das litologias com propriedades geomecânicas diferentes e, numa segunda, as zonas que apresentam características de compartimentação distintas, é possível definir posteriormente as várias zonas geotécnicas existentes. Para concluir o zonamento deve construir-se uma ou várias tabelas, que resumam as características geotécnicas médias de cada uma das zonas, em função dos parâmetros apresentados na figura anterior.

Para sobrepor o zonamento geotécnico ao zonamento ornamental, devem classificar-se as várias zonas geotécnicas de um modo qualitativo. Para realizar essa classificação, com base nos parâmetros geomecânicos que caracterizam cada uma das zonas do maciço, sugere-se, a título de exemplo, a utilização da classificação geomecânica de Bieniawski, que permite definir as cinco zonas, tal como se mostra no Quadro 5.20.

Quadro 5.20 – Exemplo de uma classificação qualitativa possível para as zonas geotécnicas, baseada na classificação geomecânica de Bieniawski.

CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS GEOTÉCNICAS	VALORES DE RMR (CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE BIENIAWSKI)
I. Muito Boa.	81-100
II. Boa	61-80
III. Razoável	41-60
IV. Má	21-40
V. Muito Má	>20

5.4. ZONAMENTO ORNAMENTAL-GEOTÉCNICO

O zonamento ornamental-geotécnico pode ser considerado como o resultado final da caracterização do jazigo marmóreo e tem como objectivo a sobreposição das zonas ornamentais (valor comercial) identificadas, com as zonas geotécnicas (características geomecânicas do maciço), com vista à definição das zonas com potencial para a exploração subterrânea.

Dentro das zonas com qualidade ornamental podem aparecer fenómenos (fracturação, carsificação, estado de tensão, etc.) que originem problemas da estabilidade da escavação. Então há necessidade de identificar essas zonas e estudar a morfologia, dimensões e características (ornamentais e geomecânicas) das zonas com potencial para a exploração subterrânea. Outra situação que poderá ocorrer é a existência de zonas com excelente comportamento geomecânico e sem qualquer aptidão ornamental (ex.: camadas de dolomitos). A sobreposição das zonas ornamentais e geotécnicas identificadas, pode ser concretizada com base nas classificações qualitativas e representados, num quadro, os respectivos resultados. Esse exercício pode ser observado no Quadro 5.21.

A definição do zonamento ornamental-geotécnico é de extrema importância para o bom desenvolvimento da exploração. Nessa discretização, deverá existir o cuidado de não se definirem muitas zonas, tal como já havia sido referido, de modo a não tornar demasiado complexo o estudo do maciço e o consequente planeamento da lavra.

Como foi referido, o zonamento ornamental-geotécnico tem como objectivo a divisão do maciço em elementos de volume, para os quais determinadas propriedades (ornamentais e geomecânicas) se mantêm dentro de certos intervalos. Com este método é possível tipificar o maciço relativamente ao método de desmonte, dimensionamento de possíveis suportes, e ainda definir o programa de monitorização das cavidades. O zonamento ornamental-geotécnico permite, ainda, estimar custos e benefícios, o que se revela importante para a elaboração do estudo de viabilidade económica da exploração subterrânea.

Quadro 5.21 – Sobreposição do zonamento ornamental e geotécnico com vista à análise da explorabilidade do jazigo marmóreo em subterrâneo.

ZONA ORNAMENTAL	ZONA GEOTÉCNICA	CONDIÇÕES DE EXPLORABILIDADE DA ZONA EM ANÁLISE
Excelente Qualidade Ornamental	Muito boa ou Boa	Excelentes condições para explorar
	Razoável	Boas condições para explorar
	Má	Deve ser analisada com cuidado a exploração da jazida
	Muito má	Não existem condições para explorar
Boa Qualidade Ornamental	Muito Boa	Excelentes condições para explorar
	Boa	Boas condições para explorar
	Razoável ou má	Deve ser analisada com cuidado a exploração da jazida
	Muito má	Não existem condições para explorar
Média Qualidade Ornamental	Boa ou muito Boa	Boas condições para explorar
	Razoável	Deve ser analisada com cuidado a exploração da jazida
	Má ou muito má	Não existem condições para explorar
Fraca Qualidade Ornamental	Boa ou muito boa	Deve ser analisada com cuidado a exploração da jazida
	Razoável, má ou muito má	Não existem condições para explorar
Sem Qualidade Ornamental	Muito boa, boa, razoável, má ou muito má	Não existem condições para explorar

Na Figura 5.51 é possível observar o resultado de um zonamento ornamental-geotécnico de um jazigo marmóreo, adoptando a metodologia anteriormente referida, e os zonamentos parciais apresentados em capítulos anteriores.

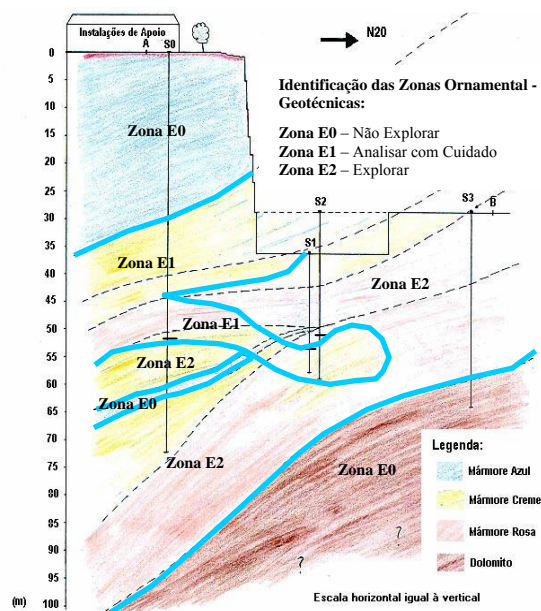



Figura 5.51 – Exemplo do resultado da sobreposição dos zonamentos ornamental e geotécnico para obter o zonamento ornamental-geotécnico final.

6. ENGENHARIA DA PRODUÇÃO EM SUBTERRÂNEO

6.1. PROGRAMA DE ACTIVIDADES

Atendendo ao Quadro 5.1, referente ao programa global de actividades a desenvolver no âmbito da metodologia em estudo para abertura de uma exploração subterrânea de mármores, mostram-se na Figura 6.1 as actividades a desenvolver na fase 2 relativa aos trabalhos de desmonte.

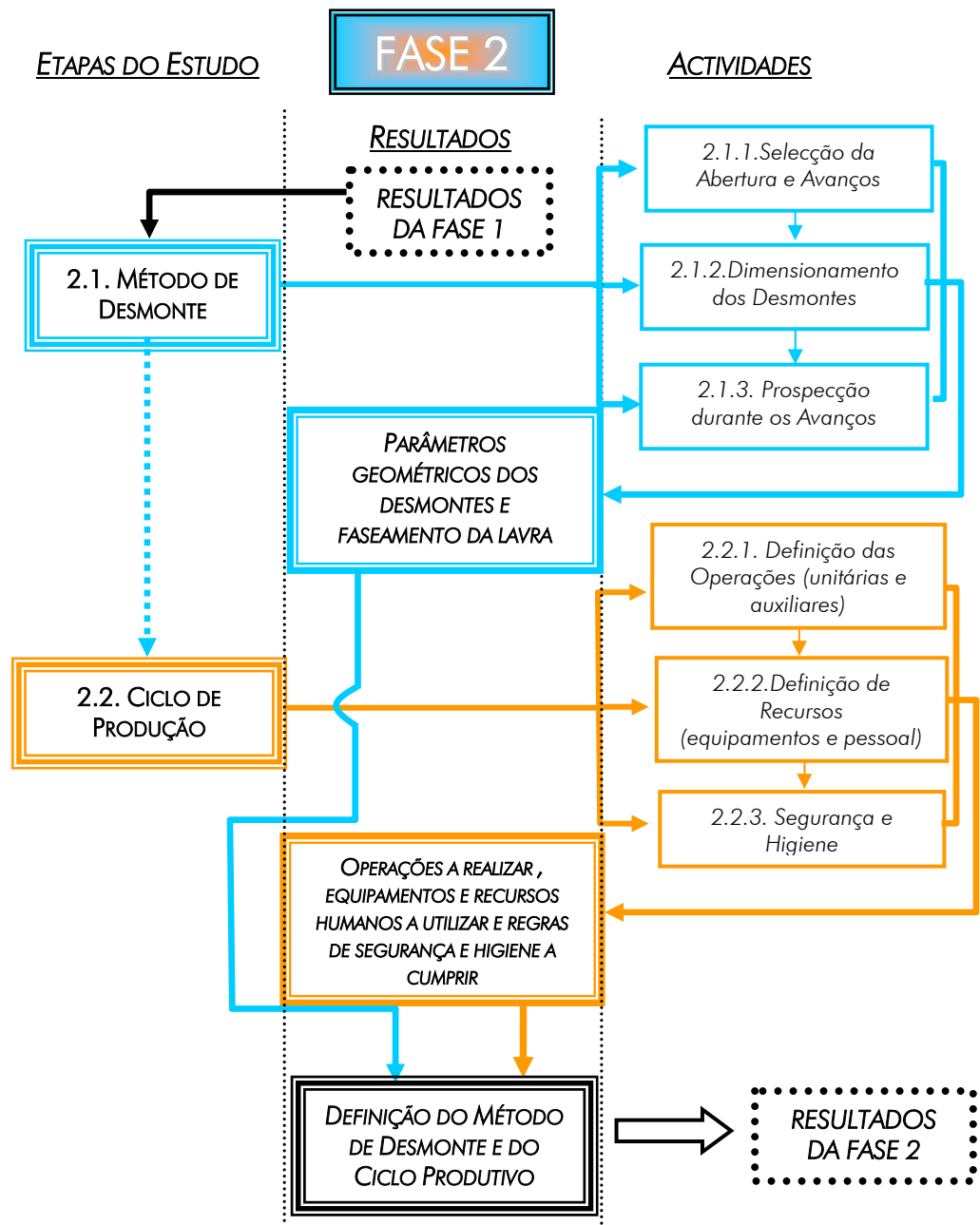



Figura 6.1 – Fluxograma da fase 2 (método de desmonte e ciclo de produção) do estudo para abertura de uma exploração subterrânea de mármores.

6.2. MÉTODO DE DESMONTE

O método de desmonte deve ser definido após a análise conjunta da informação geológica e geotécnica recolhida. Com base no resultado dessa análise, ou seja, no zonamento ornamental-geotécnico, está-se em condições de dimensionar e definir o faseamento dos desmontes. Nos capítulos seguintes apresentar-se-ão os vários estudos que devem ser efectuados com vista à definição do método de desmonte a aplicar, os quais se encontram sintetizados, ao nível das acções a desenvolver e dos resultados a obter, no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 - Acções a desenvolver e resultados a obter com o estudo do método de desmonte.

ETAPA 2.1 – MÉTODO DE DESMONTE		
ACTIVIDADE	ACÇÕES/MEIOS	RESULTADOS A OBTER
2.1.1. *Selecção da Abertura e Avanços* *2.1.2. Dimensionamento dos Desmontes* *2.1.3. Prospecção durante os Avanços*	Integração do modelo geoestrutural com o modelo geomecânico Utilização de classificações geomecânicas Dimensionamento pelo método da área tributária Simulação através de métodos de análise numérica (método dos elementos fronteira, método dos elementos finitos e/ou método dos elementos discretos) Continuação da recolha de informação geológica e geomecânica durante os avanços	Identificação das zonas a explorar e das zonas que serão deixadas para auto-suporte (zonas estéreis) Escolha do local de abertura da exploração em função das características do local e da orientação do sistema de fracturação Dimensionamento dos desmontes em função da qualidade da rocha em termos ornamentais, do seu grau de fracturação, da garantia da estabilidade sem indução de fracturação nas zonas com recurso, e da maximização da taxa de recuperação Optimização do Plano de Lavra com base em novas informações recolhidas durante os avanços

6.2.1. SELECÇÃO DA ABERTURA E DO AVANÇO DOS DESMONTES

Para dimensionar os desmontes será necessário, previamente, escolher o local de abertura da galeria e estudar a direcção a dar aos avanços, atendendo a vários factores:

- Ornamentais - qualidade do mármore presente no jazigo mineral e sua localização;
- Geológicos - disposição das camadas de mármore, suas possanças e orientações;
- Geomecânicos - situações que possam criar instabilidade nas cavidades.

Nessa selecção e durante os avanços devem ser considerados os quatro princípios da exploração mineira, ou seja:

- Segurança
- Economia
- Bom aproveitamento da jazida
- Respeito pelo ambiente

Considerando os aspectos anteriores, deve escolher-se uma entrada em galeria que permita o retorno mais rápido do capital investido (zonas de boa qualidade ornamental), a continuação dos desmontes (mesmo encontrando zonas críticas com alguma quantidade de estéreis), e a estabilidade da cavidade (dispensando ou minimizando a necessidade de suportes artificiais).

A localização da entrada da exploração é função, como é obvio, do estado e forma das frentes da exploração a céu aberto, na qual se vai iniciar a exploração subterrânea. Nessa escolha deve ter-se em atenção a profundidade onde se vão iniciar os trabalhos subterrâneos, de modo a garantir a existência de uma espessura de material sobrejacente com características adequadas à satisfação dos requisitos de estabilidade.

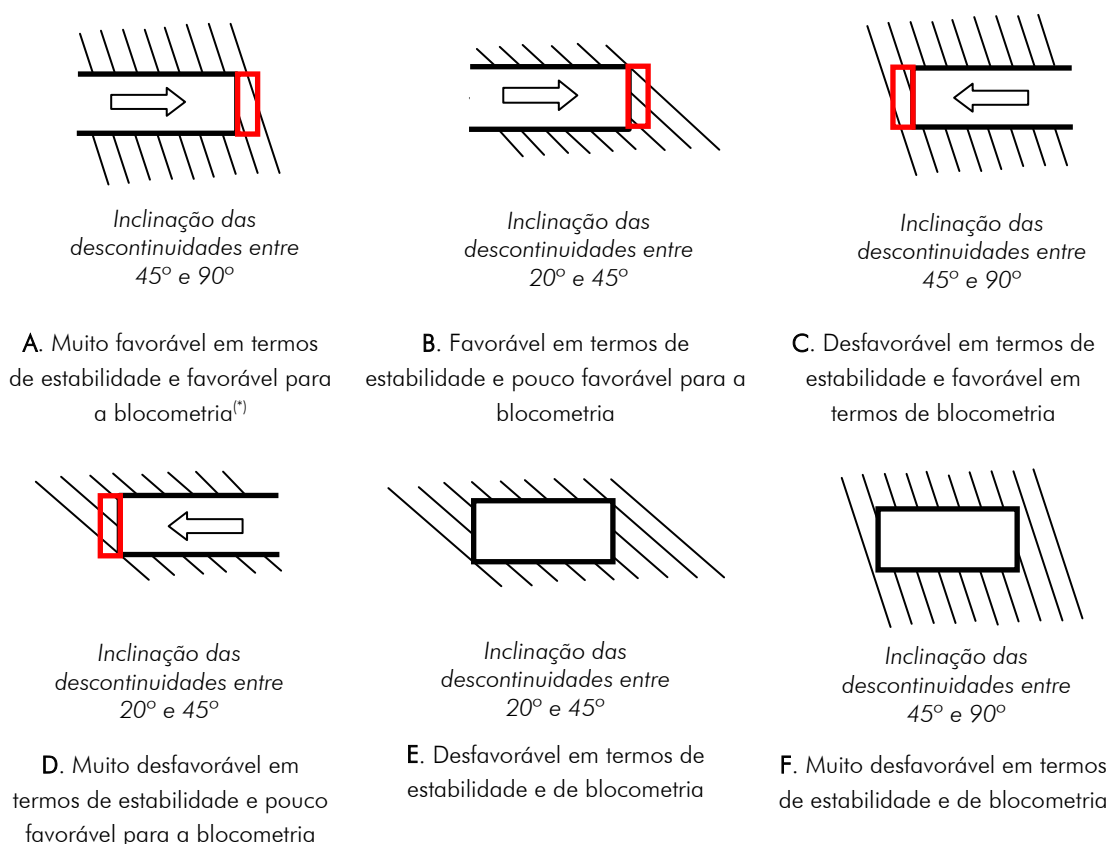
A fracturação e a orientação das camadas são dois factores importantes na escolha da zona de entrada e no faseamento dos desmontes, uma vez que se não forem adoptadas determinadas direcções de avanço em função da orientação das descontinuidades e das camadas de mármore podem verificar-se problemas graves, ao nível da estabilidade (escorregamentos) e da blocometria disponível para exploração (blocos de reduzidas dimensões), e do aproveitamento comercial do bloco (posicionamento da vergada no bloco condiciona o aproveitamento do mesmo), respectivamente. Na figura seguinte apresentam-se, em função do posicionamento das descontinuidades, algumas situações a ter em conta no direccionar dos avanços, no início da exploração.

(*) – A blocometria resultante em todos os casos apresentados é função do espaçamento entre fracturas e da sua continuidade.

Figura 6.2 – Algumas situações ao nível da fracturação que condicionam a direccão dos avanços, no início da exploração.

Outra situação que condiciona bastante os trabalhos de avanço, podendo originar grandes perdas de tempo e danos no equipamento, consiste em atravessar locais comprimidos devido a dobras ou outros fenómenos, que podem prender a ferramenta de corte e, por vezes, danificá-la. Esta ocorrência deve ser salvaguardado com base no conhecimento das tensões preexistentes e atendendo ao modelo geoestrutural da jazida (estrutura em anticlinal, em sinclinal, etc.).

Durante os avanços, numa fase inicial, deve-se entrar no interior do maciço através de uma galeria piloto com as dimensões permitidas pelo equipamento de corte de mármore em subterrâneo (roçadora). Essa galeria prolonga-se no maciço marmóreo até uma profundidade adequada, função das características do jazigo mineral e da área existente para explorar, podendo, em média rondar os 20 a 30 m, sendo função das condições de segurança e ventilação. A realização preliminar desta galeria irá permitir a recolha de informação mais concreta sobre o jazigo marmóreo, em termos geológicos e geomecânicos, e também relativamente ao método de desmonte, com vista à maximização do rendimento da exploração. Só depois de realizada essa galeria piloto se deverá proceder ao alargamento lateral dos trabalhos de desmonte. Para esse fim, poderão ser utilizadas duas técnicas distintas, as quais se apresentam na Figura 6.3.

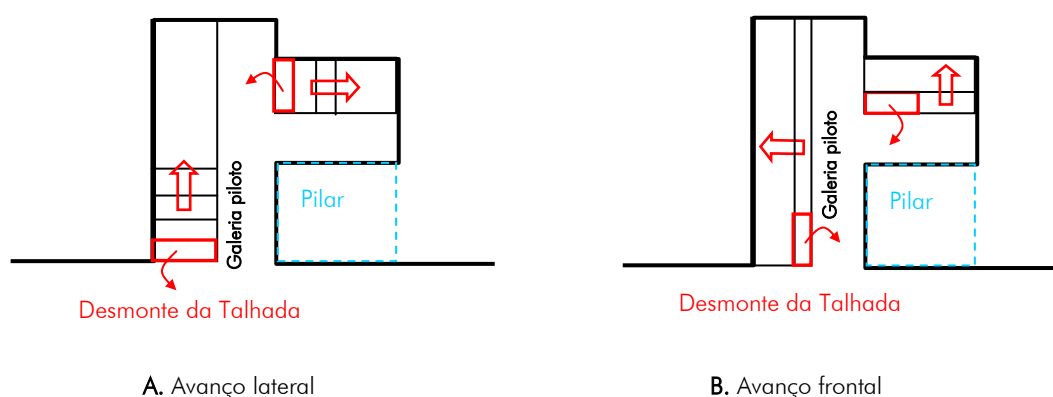



Figura 6.3 – Técnicas de alargamento da galeria piloto.

A utilização de uma ou outra técnica dependerá das características do jazigo mineral, nomeadamente da orientação da fracturação, das camadas de mármore e do espaço de manobra necessário para os desmontes.

Nos avanços da exploração, e quando se planeia a intercepção entre duas galerias, deve utilizar-se um contra-ataque de "B" dirigido a "A", tal como sugere Isaacson (1958), *in* Mendes (1985), de acordo com o apresentado na Figura 6.4, com o objectivo de minimizar a indução de fracturação no maciço, evitando situações de instabilidade. No caso da intercepção ter de ser feita segundo um ângulo agudo, o que traz problemas ao nível da concentração de tensões na cunha entre as duas galerias, e não sendo possível realizar a junção segundo um ângulo recto, também deverá ser realizado um contra-ataque (ver Figura 6.4).

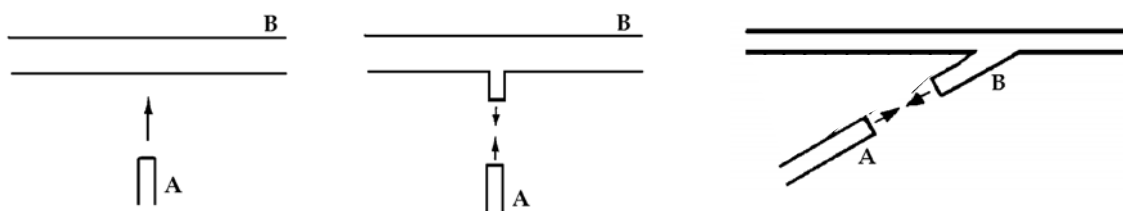



Figura 6.4 – Método de junção de duas galerias em subterrâneo.
(fonte: Isaacson, 1958, *in* Mendes, 1985)

6.2.2. DIMENSIONAMENTO DOS DESMONTES

O dimensionamento dos desmontes só deve ser realizado depois do maciço marmóreo ter sido observado, medido e analisado. Para efectuar este dimensionamento, utilizando toda a informação coligida nas fases anteriores de caracterização da jazida, deve começar-se por caracterizar o maciço através das diferentes classificações geomecânicas, embora os resultados a obter só devam servir como orientação. Posteriormente, devem utilizar-se métodos analíticos, como o da área tributária, aplicável ao desmonte por câmaras e pilares, de modo a determinar os parâmetros geométricos dos desmontes. Esses parâmetros deverão ser posteriormente optimizados, uma vez que o método da área tributária é conservativo, através da realização de simulações com os métodos de análise numérica adequados ao problema a estudar, com especial destaque para o Método dos Elementos Finitos e Método dos Elementos Discretos. Este último poderá ser aplicado em explorações perto da superfície quando o maciço se apresenta muito compartimentado (presença de blocos de rocha).

Nos capítulos seguintes apresentam-se os principais métodos de dimensionamento, considerando que o método de desmonte com maior aplicabilidade ao caso da exploração subterrânea de mármores é o de câmaras e pilares.

6.2.2.1. MÉTODO DA ÁREA TRIBUTÁRIA

O método da área tributária, consiste num método analítico de aplicação simples e que permite dimensionar os desmontes por câmaras e pilares. Nos capítulos seguintes será apresentada a base deste método e as fórmulas de cálculo que permitem dimensionar os desmontes, sendo ainda tecidas algumas considerações sobre o comportamento dos pilares e sobre o factor de segurança a adoptar.

6.2.2.1.1. Base do Método

Um dos métodos mais utilizado para o dimensionamento de câmaras e pilares é o da área tributária (área de influência), o qual considera o pilar sujeito a tensões verticais litoestáticas correspondentes à área que ele suporta. Este método compara a tensão aplicada ao pilar com a sua resistência à compressão, não contemplando, no entanto, a orientação das descontinuidades que pode alterar a distribuição das tensões.

Através de estudos realizados por vários autores, essencialmente aplicados a minas de carvão, foi possível chegar a fórmulas empíricas baseadas em ensaios de resistência à compressão, *in situ* e em laboratório, que possibilitam analisar a resistência dos pilares. Essas fórmulas podem ser observadas no Anexo IV. Nenhuma dessas fórmulas foi estudada para o mármore embora algumas tenham sido formuladas para rochas duras.

Para utilizar este método expedito e simples com maior precisão, ter-se-iam que estudar os pilares de mármore e determinar a fórmula que nos permite estimar a sua resistência à compressão. Não sendo isso possível, na zona do Anticlinal de Estremoz, em virtude da exploração subterrânea estar ainda na fase inicial e da experiência acumulada ainda não ser significativa, a melhor opção para dimensionar os desmontes é, numa primeira fase, utilizar as fórmulas existentes, sobretudo as mais conservativas, de modo a garantir a ausência de zonas de rotura que possam induzir fracturação no maciço, diminuindo a blocometria disponível para exploração.

O dimensionamento dos desmontes deve ser realizado de modo a que as câmaras e os pilares definidos maximizem a recuperação da jazida marmórea, mantendo a estabilidade do maciço e preservando a blocometria existente para exploração. Na Figura 6.5 definem-se as grandezas que intervêm no dimensionamento dos desmontes. No Quadro 6.2 apresentam-se as fórmulas de cálculo para os vários tipos de pilar.

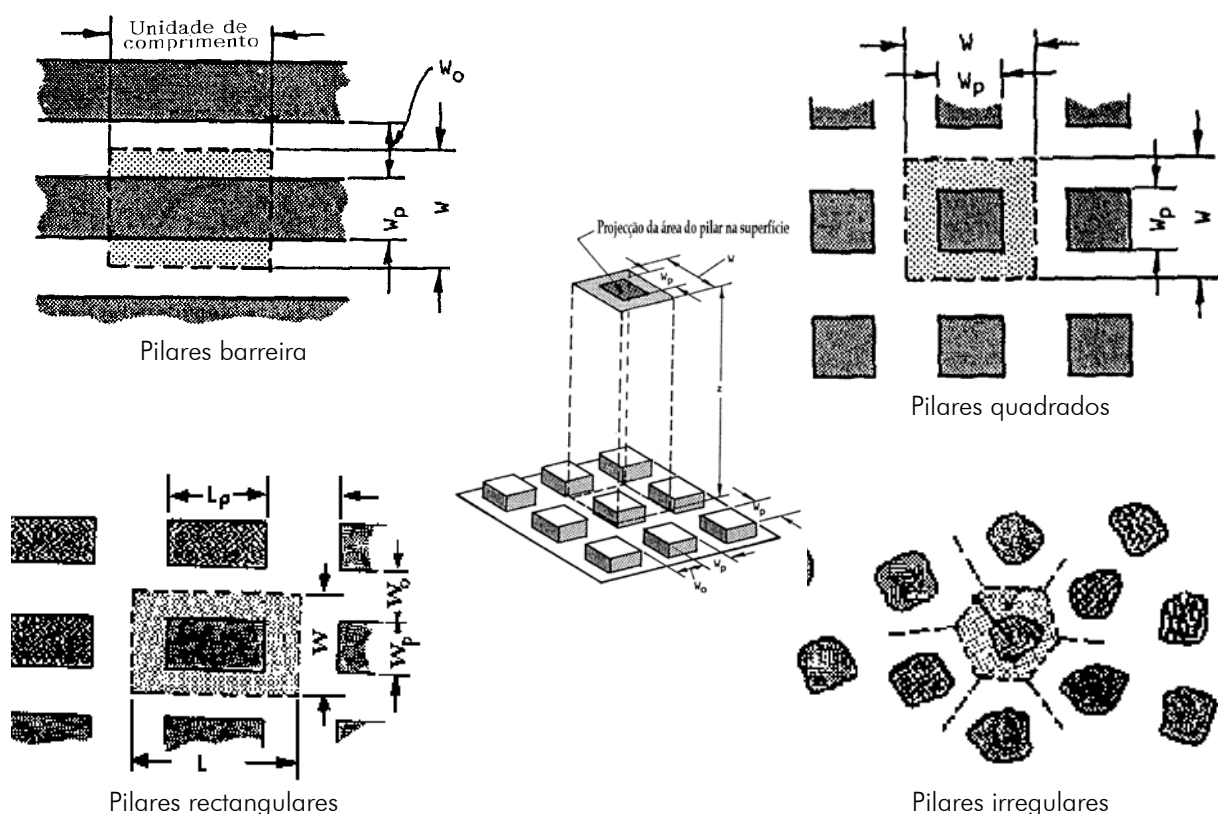



Figura 6.5 – Representação dos vários tipos de pilar e das grandezas intervenientes no dimensionamento dos pilares e das câmaras com base no método da área tributária.
(fonte: Hoek e Brown, 1980)

Quadro 6.2 – Fórmulas de dimensionamento dos desmontes por câmaras e pilares através do método da área tributária.

TENSÃO NOS PILARES (equilíbrio de forças)	RECUPERAÇÃO	FACTOR DE SEGURANÇA
$\sigma_p = \sigma_v \frac{A_t}{A_p} = \sigma_v \left(\frac{1}{1-e}\right)$ em que $\sigma_v = \gamma\, h$	$e = \frac{A_t - A_p}{A_t} = 1 - \frac{W_p\, L_p}{W\, L}$ por substituição de σ_p na expressão de F_S sai: $e = 1 - F_s \frac{\sigma_v}{\sigma_r}$	$F_s = \frac{\sigma_r}{\sigma_p}$
PILARES BARREIRA	PILARES RECTANGULARES	PILARES QUADRADOS
$e = 1 - \frac{W_p}{W}$ $W_p = \frac{F_s\, W_0\, \sigma_v}{\sigma_r - F_S\, \sigma_v}$	$e = 1 - \frac{W_p\, L_p}{W\, L}$ $W_p = \frac{W_0}{\sqrt{\frac{k\,\sigma_r}{F_s\,\sigma_v} + \left(\frac{k-1}{2}\right)^2} - \left(\frac{1+k}{2}\right)}$ em que $k = \frac{L_p}{W_p}$	$e = 1 - \frac{W_p^{\;2}}{W^2}$ $W_p = \frac{W_0}{\sqrt{\frac{\sigma_r}{F_s\,\sigma_v}} - 1}$

<u>Definição dos Parâmetros</u> (ver figura anterior):

A_t – Área total ou tributária
A_m – Área a desmontar
A_p – Área do pilar
σ_p – Tensão aplicada actuante no pilar
σ_v – Tensão vertical
σ_r – Resistência do pilar
γ - Peso específico do terreno sobrejacente

W – Largura da área total
L – Comprimento da área total
W_p – Largura do pilar
L_p – Comprimento do pilar
W_0- Vão das câmaras
e – Taxa de recuperação
F_S – Factor de segurança
h – Profundidade da escavação

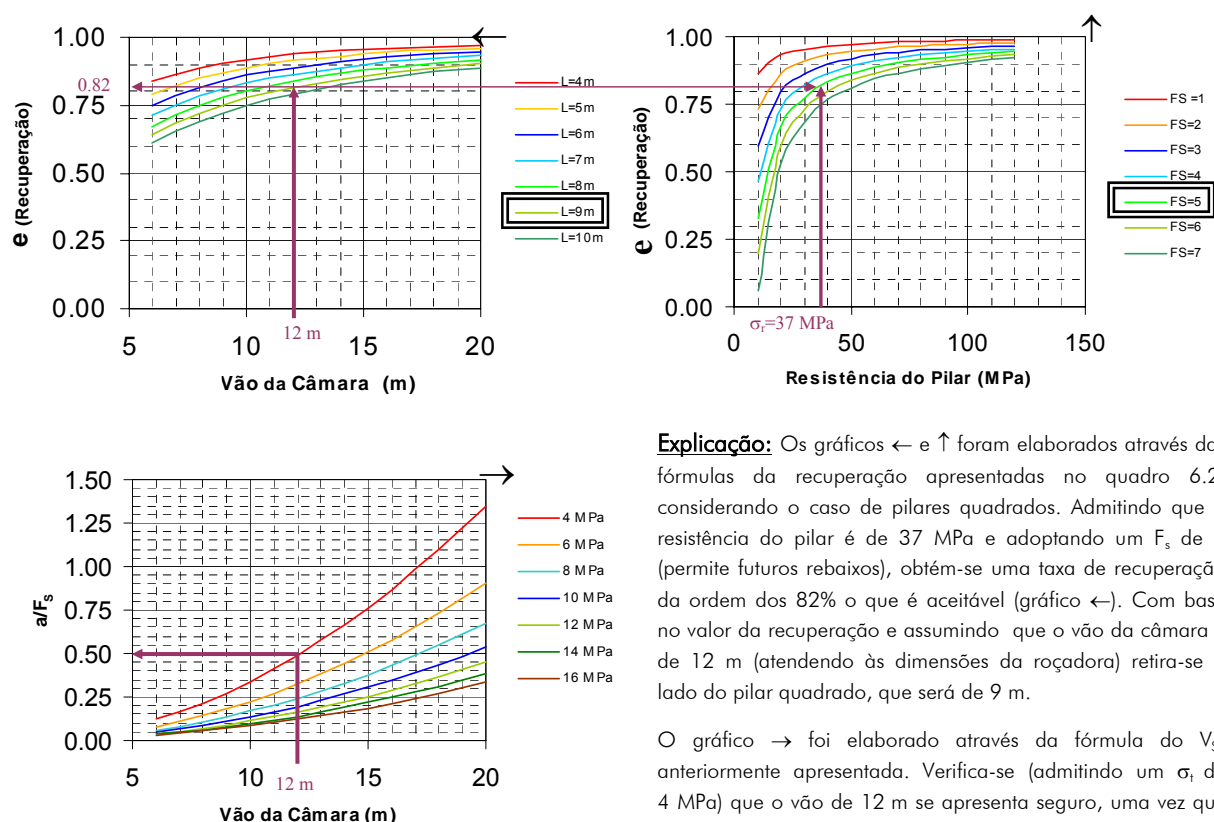
Depois de realizado o dimensionamento dos desmontes em função do factor de segurança e da resistência dos pilares, deve ser verificado se o vão das câmaras determinado é ou não seguro, por aplicação da teoria das vigas encastradas. Esta análise deve ser aplicada a maciços estratificados com base nas seguintes fórmulas (Obert, Duvall e Merrill, 1960):

$$Vs_1 = \sqrt{\frac{2a\,\sigma_t}{\gamma\, F_s}} \quad \text{(só existe acção do peso próprio)} \qquad \text{ou} \qquad Vs_2 = \sqrt{\frac{2a\,\sigma_t}{(\gamma + P/a)F_s}} \quad \text{(acção do peso próprio e de forças exteriores)}$$

em que: Vs_1 e Vs_2 – Vãos seguros do tecto
a – Espessura da laje de cobertura
σ_t – Resistência à tracção da laje que forma o tecto
F_S – Factor de segurança
γ - Peso específico do material
P – Pressão externa devida ao ar, água, etc.

Comparando o vão seguro (Vs), função da espessura da laje, das características do material que a forma, e do factor de segurança admitido, com o vão (V) das câmaras, determinado pelo método da área tributária, pode concluir-se que, caso Vs seja superior a V, se está em segurança. Caso contrário deve-se redimensionar as câmaras e os pilares, de modo a obter um vão seguro para as

câmaras, inferior ao valor de Vs. A fórmula de Vs_1 é utilizada, geralmente, para analisar o vão das câmaras do piso de entrada em subterrâneo, enquanto que a fórmula de Vs_2, permite dimensionar os pilares soleira a deixar entre pisos.

O dimensionamento das câmaras e dos pilares pode ser realizado através de gráficos, tais como os que se mostram na Figura 6.6, construídos pelas fórmulas anteriormente apresentadas, atendendo às características dos materiais que irão constituir os pilares naturais e a laje de tecto. Com base nesses gráficos pode-se estudar a melhor solução, integrando todas a variáveis em conjunto.

Explicação: Os gráficos ← e ↑ foram elaborados através das fórmulas da recuperação apresentadas no quadro 6.2, considerando o caso de pilares quadrados. Admitindo que a resistência do pilar é de 37 MPa e adoptando um F_s de 5 (permite futuros rebaixos), obtém-se uma taxa de recuperação da ordem dos 82% o que é aceitável (gráfico ←). Com base no valor da recuperação e assumindo que o vão da câmara é de 12 m (atendendo às dimensões da roçadora) retira-se o lado do pilar quadrado, que será de 9 m.

O gráfico → foi elaborado através da fórmula do V_{S1} anteriormente apresentada. Verifica-se (admitindo um σ_t de 4 MPa) que o vão de 12 m se apresenta seguro, uma vez que se pretende abrir a exploração a cerca de 40 m de profundidade, o que significa que a laje do tecto apresenta mais de 50 cm.

Figura 6.6 – Exemplo de dimensionamento, através do método da área tributária e por representação gráfica, dos pilares e das câmaras de uma exploração subterrârea de mármores em que os pilares são quadrados.

6.2.2.1.2. Comportamento dos Pilares

Os pilares abandonados numa exploração subterrânea podem ser classificados, de acordo com a sua função, do seguinte modo (Salamon, 1983):

- Pilares de suporte – elemento que assegura o sustimento local do tecto dos desmontes;
- Pilares de protecção – têm por função proteger estruturas subterrâneas ou isolar zonas de exploração;
- Pilares de controlo – destinam-se ao controlo global da convergência das cavidades a fim de minimizar a libertação de energia (evita golpes de terreno).

A experiência mostra que a resistência à compressão de um provete de rocha é directamente proporcional à velocidade de aplicação da força, ou seja, quanto menor for o tempo dado à rocha para se deformar mais tardiamente se atinge a rotura. Deste modo, será de esperar que a resistência de um pilar diminua com o tempo, segundo Obert e Duvall (1967). A resistência de um pilar, além do tempo é influenciada pelos seguintes aspectos (baseado em Sheorey,1993):

- Estado de tensão preexistente;
- Natureza dos contactos com os maciços em que estão integrados;
- Estado de alteração do material rochoso;
- Presença de descontinuidades;
- Inclinação das descontinuidades;
- Características de resistência das descontinuidades;
- Presença de água.

Outros factores que afectam a resistência dos pilares estão intimamente ligados com a sua dimensão, nomeadamente:

- **Efeito de Escala** – verifica-se, para provetes cúbicos, que abaixo de uma determinada dimensão (dimensão a partir da qual o provete é representativo do maciço rochoso, incorporando todas as famílias de descontinuidades do maciço), a resistência aumenta com a diminuição da aresta, enquanto que para arestas superiores a esse valor, a resistência se mantém (Bieniawski, 1969), tal como se mostrou na Figura 5.23.
- **Esbeltez** – considerando "W_p" a largura do pilar e "H_p" a uma altura, verifica-se segundo Salamon e Oravecz (1976) que:
    - Para "W_p" constante, a resistência diminui com o aumento da altura "H_p" (maior esbeltez);
    - Para "H_p" constante, a resistência diminui com a diminuição da largura "W_p" (maior esbeltez).

    Nota: Para pilares em que $H_p/W_p<3$ o enfraquecimento devido à esbeltez pode ser desprezável (Fornaro e Bosticco, 1995a).

Os factores anteriormente apresentados estão relacionados com as condições de desmonte, sendo função das características mecânicas do maciço rochoso que se pretende estabilizar e da taxa de recuperação ou rendimento que se tenciona obter. As dimensões dos pilares a deixar devem ser estudadas de modo a atingir um ponto de equilíbrio, economicamente viável, entre:

- A estabilidade do maciço (ausência de fracturação induzida);
- A taxa de recuperação da exploração (percentagem de quantidade de material a extrair);
- A economia da exploração (dar o máximo de lucro).

No que concerne à recuperação, esta influencia a carga sobre o pilar, fazendo com que essa carga aumente de acordo com o apresentado na Figura 6.7 (Brady e Brown, 1985). O avanço dos desmontes, e consequente aumento das dimensões da área escavada e do número de pilares, também influencia a carga exercida sobre os pilares, do modo ilustrado na Figura 6.8.

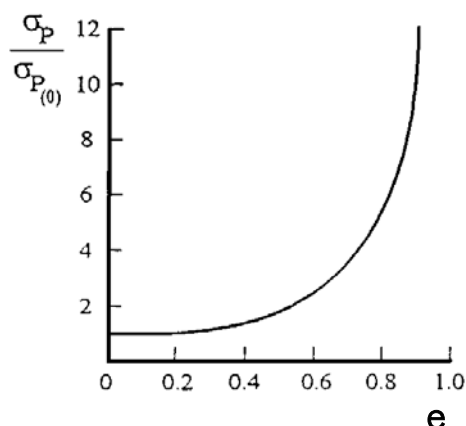



Figura 6.7 – Variação da carga sobre o pilar com a recuperação.
(adaptado de Brady e Brown, 1985)

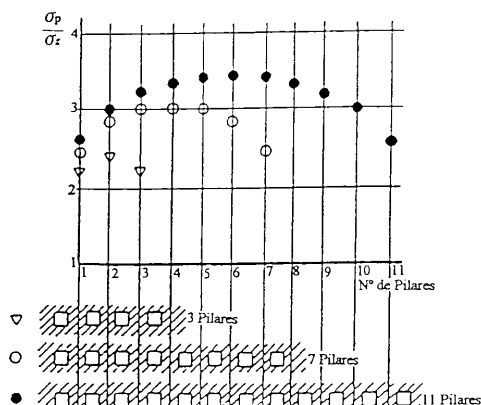



Figura 6.8 – Variação na carga dos pilares devido ao aumento das dimensões de um desmonte, em que a taxa de recuperação é de 75% e o módulo de elasticidade do maciço é quádruplo do dos pilares.
(adaptado de Mendes, 1985)

Atendendo à Figura 6.8, constata-se que os pilares centrais são os que sofrem maior carga e que se regista um aliviar de tensão sobre os pilares próximos destes. É também perceptível pela mesma figura, que num desmonte de câmaras e pilares, à medida que se aumenta o vão máximo global da exploração (aumenta o número de pilares abandonados), a tensão actuante é incrementada nos pilares centrais. O valor máximo da tensão actuante (σ_p) nos pilares centrais de uma exploração deste tipo pode ser calculado, para um dado valor da taxa de recuperação, pelo método da área tributária que foi apresentado no capítulo anterior.

No esquema da figura anterior há que ter em consideração que o aumento dos desmontes pode levar a um aumento significativo do σ_p e, consequentemente, ao aparecimento de roturas nos pilares centrais e ao incremento de carga nos pilares vizinhos que, de acordo com as características de deformabilidade do maciço, podem dar origem a colapsos mais ou menos perigosos. Para resolver estas situações podem ser utilizados pilares barreira que evitam o alcançar do vão crítico por parte dos desmontes. Estes pilares, que já foram definidos anteriormente, podem ser deixados no próprio maciço rochoso ou construídos com escombros (ver Figura 6.9).

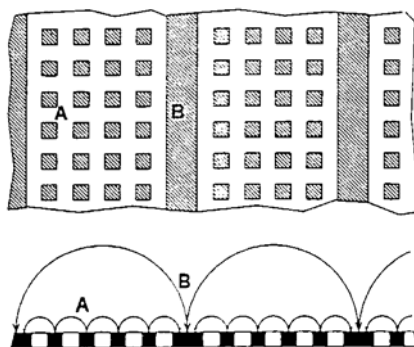



Figura 6.9 – Pilares de desmonte (A), pilares barreira (B) e respectivos arcos de pressão.
(fonte: Silva, 1995)

Além dos aspectos anteriormente focados, o recurso a pilares barreira pode ser também muito útil nas explorações subterrâneas de mármore durante as operações de rebaixo que motivam a esbeltez dos pilares e a consequente redução da sua capacidade de resistência, uma vez que este tipo de pilares são menos sensíveis a este fenómeno, comparativamente com os pilares rectangulares ou quadrados. Assim, em jazidas em que seja possível a adopção de pilares barreira em função da morfologia do mesmo (ex.: faixas de mármore estreitas e compridas, que se estendem em profundidade), existe toda a vantagem na utilização destes elementos de suporte, em detrimento dos pilares esteios.

A distribuição de tensões num pilar pode ser vista na Figura 6.10 atendendo à sua forma (pilar barreira e pilar quadrado). É visível que as tensões principais máximas assumem valores mais altos junto das faces dos pilares, e que no caso de pilares quadrados os valores máximos aparecem, regra geral, junto das arestas dos mesmos.

Pilar Barreira

Pilar Quadrado

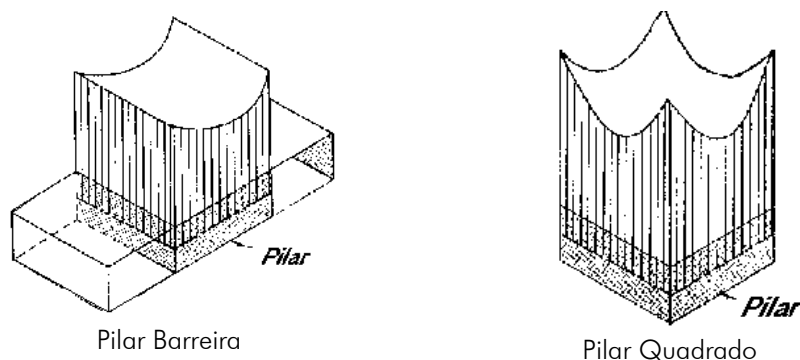



Figura 6.10 – Distribuição das tensões principais máximas na secção do pilar, considerando que este está rodeado de pilares similares.
(adaptado de Hoek e Brown, 1980)

A ruína dos pilares abandonados durante o avanço da exploração é, normalmente, motivada por acções de corte que de acordo com a teoria de Mohr-Coulomb, ocorrem em planos que fazem ângulos menores do que 45° com as faces dos mesmos.

A previsão do comportamento dos pilares é muito importante para o dimensionamento e planeamento racional da lavra, de modo a alcançar um compromisso óptimo entre a segurança e a recuperação. É possível realizar esta previsão através do conhecimento das características do maciço rochoso, com base na sua caracterização geomecânica (realização de ensaios laboratoriais e *in situ*) ou por experiência em casos semelhantes. Esta última situação não se pode utilizar no Anticlinal, neste momento, em virtude do conhecimento adquirido nesta matéria ser ainda diminuto.

Para estudar a estabilidade dos pilares e o seu comportamento, deverá ser analisada a fracturação presente. Assim, um levantamento contínuo da fracturação e a existência de fotografias da mesma, permitirá o seu estudo ao longo do tempo, alertando para situações de perigo. As fracturas mais penalizantes para a estabilidade do pilares são as que os atravessam lado a lado. Na Figura 6.11 apresentam-se algumas situações passíveis de ocorrer nos desmontes de jazigos marmóreos devido à presença de descontinuidades nos pilares.

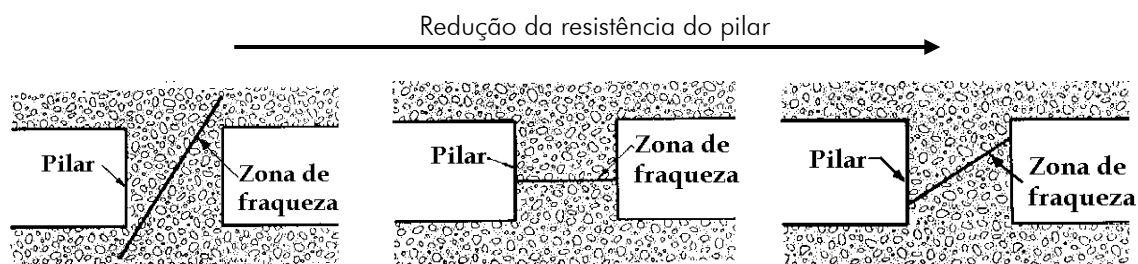



Figura 6.11 – Possíveis posições de descontinuidades nos pilares.
(adaptado de Page *et al.*, 1983)

6.2.2.1.3. *Factor de Segurança*

A incerteza que está presente na estimativa dos parâmetros de resistência do maciço rochoso, normalmente diferentes dos parâmetros que se obtêm através das pequenas amostras de rocha ensaiadas em laboratório, e nos erros que se cometem ao assumir determinadas hipóteses para resolver os problemas de dimensionamento dos desmontes, implica a utilização de um factor de segurança (Obert, Duvall e Merrill, 1960). Esse factor de segurança (F_S) é definido como o quociente entre a tensão de rotura e a tensão de trabalho ou actuante no elemento resistente, ou seja:

$$\text{Factor de Segurança } (F_S) = \frac{\sigma_r}{\sigma_a}$$

em que: σ_r – Resistência do elemento

σ_a – Tensão actuante no elemento

Atendendo à expressão anterior, tem-se que:

$$F_S < 1 \Rightarrow \text{ROTURA}$$
$$F_S > 1 \Rightarrow \text{SEGURANÇA}$$

Segundo Parker (1973), o factor de segurança é uma medida da ignorância da indústria, a qual pode custar vidas e acarretar elevados custos financeiros para a empresa.

Quanto maior o valor do factor de segurança, maior é a garantia de que a estrutura não sofrerá ruína. Apesar disso, e sendo necessário preservar a segurança dos trabalhadores e a protecção dos equipamentos, o valor do F_S deve ser estabelecido adoptando como critério o equilíbrio entre a segurança e a recuperação da jazida, de modo a atingir os objectivos, quer da segurança, quer da viabilidade económica da exploração.

Na engenharia de minas, ao contrário da engenharia civil, interessa apenas manter a estabilidade das galerias durante o tempo necessário para extrair o minério existente. Por este motivo, utilizam-se, geralmente, coeficientes de segurança perto da unidade, enquanto que a engenharia civil utiliza coeficientes de segurança muito superiores. Esta filosofia não pode ser aplicada a toda a indústria extractiva, como é o caso das explorações subterrâneas de mármore, uma vez que nesta actividade as cavidades têm que ser dimensionadas com coeficientes de segurança tais que impeçam a indução de fracturação extra no maciço. Isto, porque a diminuição da blocometria disponível para exploração influencia sobremaneira a viabilidade económica da mesma, como se

viu em capítulos anteriores. Este facto aliado à possível utilização futura do espaço subterrâneo, posiciona a exploração de mármores em subterrâneo próxima dos trabalhos de engenharia civil.

Nas explorações subterrâneas de mármore o factor de segurança deve ser aplicado de modo a manter a estabilidade do maciço durante a abertura das cavidades mas, mais do que isso, garantir a ausência de fracturação induzida em redor das mesmas. No que respeita à estabilidade deve ter-se especial atenção para o facto dos trabalhos de rebaixo das galerias aumentarem a esbeltez dos pilares e, consequentemente, diminuírem a sua resistência. Pelo exposto, deve ter-se alguma sensibilidade na adopção do factor de segurança a utilizar, devendo o mesmo contemplar os seguintes aspectos:

- Necessidade de realizar rebaixos da galeria em função da profundidade da jazida (se esta situação não for prevista no início da exploração, poderá inviabilizar a extracção de mármore em profundidade);
- Aparecimento de fracturas e outros fenómenos que poderão enfraquecer a resistência dos pilares (ex.: fenómenos de alteração, cavidades cársicas, etc.);
- Garantir que, mesmo com o rebaixo e com o aparecimento de fenómenos nos pilares responsáveis pelo enfraquecimento da sua resistência, a segurança dos trabalhadores e a blocometria disponível para exploração não são afectadas com o evoluir dos trabalhos.

A utilização de factores de segurança na ordem dos 5 ou mais, vem beneficiar o futuro aproveitamento do espaço subterrâneo para outros fins, uma vez que a estabilidade do maciço ficará, na maior parte dos casos, garantida.

A escolha do factor de segurança deve ser realizada, no caso da exploração subterrânea de mármores, com muito cuidado, atendendo às características geomecânicas do maciço (resistência e deformabilidade), e garantindo a estabilidade e a sanidade do jazigo mineral ao nível da fracturação, ao mesmo tempo que deve servir a evolução futura dos desmontes. A diminuição das dimensões dos pilares e respectiva redução do factor de segurança, caso se comprove que o mesmo se revela elevado, pode ser sempre realizada, embora o contrário não seja válido, sem recorrer a sistemas de suporte artificiais.

6.2.2.2. MÉTODOS NUMÉRICOS

Os resultados obtidos pelos métodos analíticos (método da área tributária e outros) devem ser posteriormente estudados através de uma análise por métodos numéricos, dos quais se salientam o Método dos Elementos Finitos, pelo facto de ser uma ferramenta de fácil utilização, no caso de análises bidimensionais, e de estar bastante difundido, existindo, actualmente, uma grande experiência na sua aplicação em estudos geomecânicos.

Por outro lado, importa referir a potencialidade que o Método dos Elementos Discretos apresenta para estudos de abertura de cavidades subterrâneas superficiais, cuja estabilidade está, essencialmente, condicionada pela resistência das fracturas que compartimentam o maciço. Assim, e apesar de ser um método ainda em fase de desenvolvimento, pode ser bastante útil no estudo de explorações subterrâneas de mármore pouco profundas.

Com a aplicação dos métodos de análise numérica, através de programas computacionais, é possível comprovar a validade dos resultados obtidos com as classificações geomecânicas e com o método da área tributária e tentar a sua optimização. Nas simulações a realizar devem ser criados modelos que traduzam o caso em estudo, em termos geométricos e dos valores das propriedades geomecânicas necessários ao programa, para que os resultados sejam representativos.

No caso das explorações subterrâneas de mármore interessa optimizar as dimensões das câmaras e dos pilares a deixar. Assim, os estudos a efectuar devem permitir avaliar a resistência dos pilares com a diminuição da sua esbeltez, de modo a definir uma altura óptima para as cavidades, e ao mesmo tempo estudar a variação do comprimento do vão das câmaras com vista à sua optimização. Depois de definida a dimensão adequada dos pilares, a altura das cavidades e os vão das câmaras, não esquecendo que essa definição deve atender ao bom aproveitamento do jazigo marmóreo, à economia e à segurança dos trabalhos, evitando a fracturação do maciço, será conveniente estudar, simultaneamente, a possível contribuição da presença de fracturas nos pilares para a redução da sua resistência e a espessura do pilar soleira a deixar entre níveis de exploração, caso tal situação se verifique.

Para o dimensionamento de um desmonte por câmaras e pilares para exploração subterrânea de mármores sugere-se a utilização da metodologia apresentada no Anexo V.

6.2.3. PROSPECÇÃO DURANTE O AVANÇO

Durante o avanço dos desmontes o responsável técnico pela exploração deverá elaborar relatórios periódicos, dos quais devem constar as informações geológicas e geomecânicas que se vão recolhendo. Todos os fenómenos novos que apareçam devem ser fotografados, mapeados e estudados com vista a uma futura optimização do Plano de Lavra e da lavra, caso tal se justifique. Na ausência do responsável técnico da pedreira, e quando se registe o aparecimento de novas informações durante avanços, deverá ser o encarregado a registar essa ocorrência.

O zonamento ornamental-geotécnico, inicialmente realizado, pode ser complementado com a informação recolhida ao longo do avanço da exploração. O mesmo sucede no estudo da compartimentação do maciço que permite a determinação da blocometria disponível para exploração, a qual poderá ser maximizada com as informações recolhidas durante os avanços da exploração.

Numa primeira fase é, normalmente, útil realizar uma galeria piloto, tal como foi referido em capítulos anteriores, a qual deve penetrar no maciço tanto quanto possível de modo a recolher o maior número de informação do jazigo mineral. Estes novos dados, recolhidos durante o avanço dos trabalhos na galeria, podem ser do seguinte tipo:

- Qualidade da rocha ao longo da galeria;
- Comportamento estrutural das litologias com qualidade ornamental;
- Fracturação do maciço (blocometria);
- Comportamento geomecânico do maciço (resistência e deformação);
- Condições de estabilidade (necessidade de sustimento).

Estas informações permitem actualizar o projecto de engenharia com vista à optimização do desenho dos desmontes inicialmente apresentados às entidades competentes (incluídos no Plano de Lavra), com os objectivos seguintes:

- Incrementar a recuperação do material de boa qualidade;
- Melhorar a segurança dos trabalhos;
- Definir com mais rigor os métodos de sustimento a utilizar.

O recurso à galeria piloto, apresenta várias vantagens, dada a sua reduzida dimensão, uma vez que minimiza os custos de estabilização durante a fase inicial dos desmontes.

A prospecção deve continuar durante o avanço dos desmontes, mesmo após o alargamento da galeria piloto, com vista à optimização do método de desmonte, quer em termos técnicos, quer económicos. A prospecção a efectuar nessa fase de exploração deve recorrer aos seguintes métodos:

a) Observação das frentes de desmonte

- Estudo das litologias presentes (mapeamento geológico das frentes);
- Mapeamento das fracturas, grau de fracturação e suas características (orientação, espaçamento, continuidade, etc.);
- Grau de alteração;
- Caudais de água;
- Individualização de blocos ou cunhas (hasteais e tectos);
- Outros que se considerem necessários.

b) Estudo com o Martelo de Schmidt

- Caracterização mecânica do maciço em causa (estudo das frentes, pilares, etc.);
- Verificar se os parâmetros de cálculo assumidos para o dimensionamento dos desmontes estão dentro da margem de segurança considerada.

c) Sondagens mecânicas

- Estudo das litologias a encontrar nos avanços (boa ou má qualidade ornamental);
- Estudo da fracturação presente nos avanços;
- Estimativa da blocometria;
- Caracterização geomecânica dos materiais rochosos e das diaclases atravessadas pela sondagem com recursos a ensaios mecânicos sobre as carotes (resistência e deformabilidade).

d) Medição das tensões *In Situ*

- Análise de possíveis variações do estado de tensão (motivada por dobras ou outros fenómenos geológicos).

A realização deste tipo de prospecção deve ser planeada e coordenada pelo responsável técnico da exploração, podendo a mesma ser realizada pela empresa caso possuam os equipamentos necessários e o pessoal especializado para tal. Caso contrário deve recorrer-se a serviços externos. Esta prospecção constitui um complemento aos trabalhos já realizados durante a fase do projecto,

permitindo a realização de estudos de retroanálise que poderão contribuir para optimizar e ajustar o projecto de engenharia elaborado, com importantes benefícios económicos e de segurança para a exploração.

6.3. CICLO DE PRODUÇÃO

O ciclo de produção significa, em sentido lato, todas as operações, equipamentos e pessoal necessários à realização dos trabalhos, estejam directamente ou indirectamente ligados aos trabalhos de desmonte. Dele fazem parte, também, as regras de segurança e higiene que devem ser cumpridas no sentido de melhorar as condições de trabalho no interior das galerias subterrâneas. No Quadro 6.3 apresentam-se as actividades a desenvolver nesta etapa do estudo, bem como os principais resultados a obter. Nos capítulos seguintes serão apresentadas as principais fases do ciclo produtivo.

Quadro 6.3 - Acções a desenvolver e resultados a obter com a definição do ciclo de produção e com os aspectos com ele relacionados.

ETAPA 2.2 – CICLO DE PRODUÇÃO		
ACTIVIDADE	*ACÇÕES/MEIOS*	*RESULTADOS A OBTER*
2.2.1. Definição das Operações *2.2.2. Definição dos Recursos* *2.2.3. Segurança e Higiene*	Levantamento das condições logísticas Levantamento dos equipamentos existentes Estudo das operações a realizar Estudo dos equipamentos, ferramentas, consumíveis e recursos humanos necessários	Identificação das condições operacionais necessárias para se iniciar a exploração (acessos, electricidade, fornecimento de água) Equipamentos e ferramentas necessários. Definição da sequência de operações com identificação dos equipamentos, ferramentas, consumíveis e recursos humanos necessários Dimensionamento da drenagem, iluminação e ventilação dos desmontes Definição das necessidades ao nível de instalações de apoio, medidas de segurança e higiene e ambientais

6.3.1. DEFINIÇÃO DAS OPERAÇÕES

6.3.1.1. OPERAÇÕES UNITÁRIAS

A exploração de rocha em subterrâneo pode ser realizada, fundamentalmente, em duas situações distintas: quando existe uma exploração a céu aberto a partir da qual se entra em subterrâneo, em terreno plano, e outra em que se inicia a exploração em flanco de encosta. Podem surgir ainda vários tipos de exploração mista, mesmo em flanco de encosta, embora seja mais difícil o aparecimento de uma exploração em subterrâneo num terreno plano sem existir previamente um céu aberto, o que se prende, essencialmente, com questões económicas. Em qualquer das

situações referidas na exploração em subterrâneo, os desmontes são caracterizados por duas fases distintas que se ilustram na Figura 6.12.

A. Escavação da galeria

B. Rebaixo da galeria (técnicas de desmonte idênticas ao céu aberto)

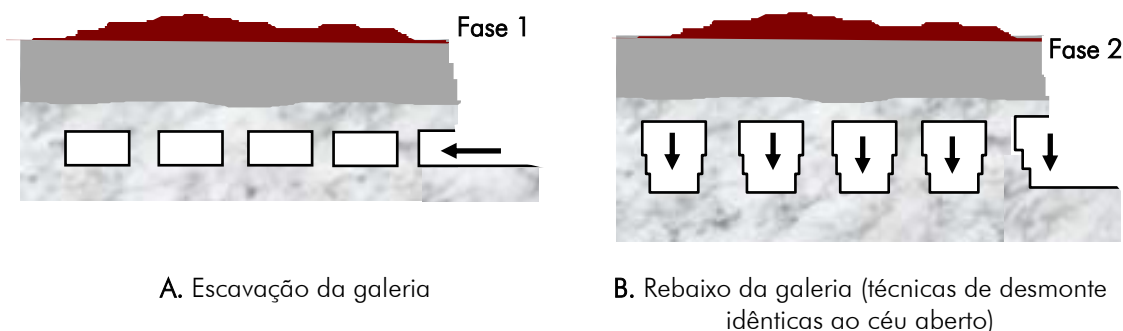
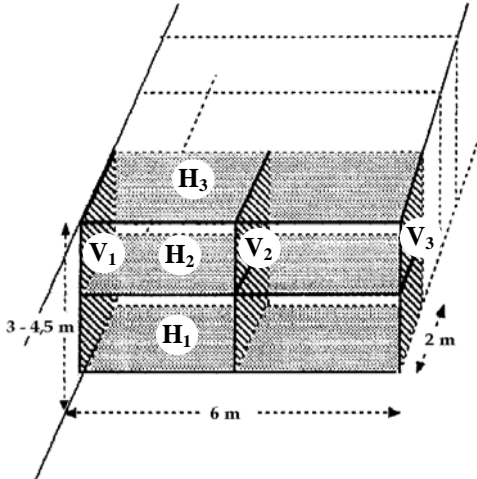
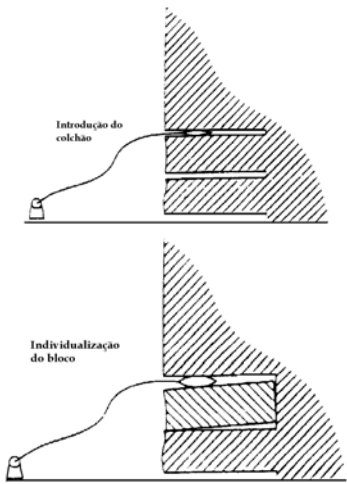
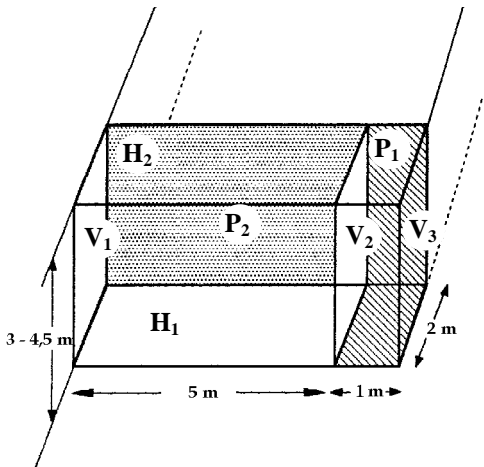
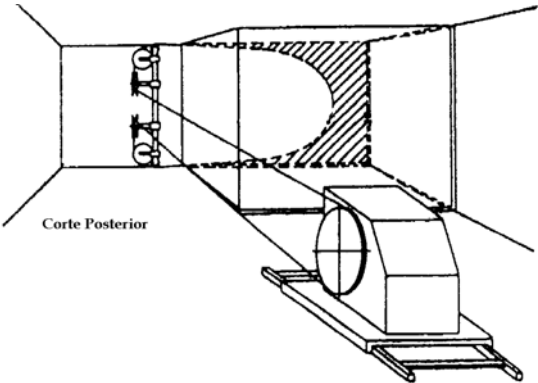



Figura 6.12 – Ilustração das duas fases de desmonte em subterrâneo: a entrada em galeria e o rebaixo.

Atendendo à figura anterior, a *Fase 1 - Escavação da galeria* é realizada segundo técnicas particulares, que podem ser ajustadas ao tipo de jazida. Estas técnicas de desmonte juntam, normalmente, a utilização da roçadora (de cadeia ou de cinta diamantada) com a máquina de fio diamantado, embora possam apenas utilizar a roçadora.

A escavação da galeria desenvolve-se de acordo com a sequência de operações apresentada nos dois quadros das páginas seguintes, nos quais são descritos dois métodos de desmonte possíveis. As dimensões apresentadas, nos quadros seguintes, podem variar em função do tipo de equipamento utilizado e das características do jazigo marmóreo, embora possam ser tomadas como dimensões frequentemente utilizadas, atendendo aos equipamentos para lavra subterrânea de mármores actualmente disponíveis no mercado.

No exemplo do método A, apresentado no Quadro 6.4, também pode ser utilizada a máquina de fio para realizar os cortes posteriores dos restantes blocos, após ter sido destacado do maciço o primeiro bloco, com recurso a colchões hidráulicos ou pneumáticos.

Os blocos resultantes do desmonte de cada talhada de mármore são extraídos por meio de máquinas (pás carregadoras ou escavadoras giratórias) com o auxílio de cabos. Depois de limpa a frente de desmonte, iniciam-se novamente os cortes na nova frente formada, avançando assim com a exploração.

No caso de existirem várias frentes de trabalho, a roçadora de galeria vai alternando os cortes das talhadas nos vários locais em exploração, o que aumenta a taxa de ocupação deste equipamento, evitando os tempos mortos da fase de remoção das talhadas desmontadas. Assim, e sempre que possível, deve-se tentar avançar com mais do que uma frente de exploração.

Quadro 6.4 – Sequência de operações para desmontar uma talhada de mármore em subterrâneo utilizando a roçadora e colchões hidráulicos ou pneumáticos.

MÉTODO A – ROÇADORA + COLCHÕES	
Descrição	**Ilustração**
1. Realização do corte horizontal de base ($2 \times 6 m^2$), com a roçadora.	
2. Realização de um corte horizontal do topo a uma altura de 3 m até 4.5 m em relação ao corte anterior com as mesmas dimensões, também com a roçadora.	
3. Realização de um corte horizontal com a roçadora, à mesma altura entre os dois cortes horizontais já realizados.	
4. Execução de dois cortes verticais com a roçadora, com profundidades de 2 m (pode ser de 1.5 m) e altura entre 3 m e 4.5 m, dependendo da altura fixada para a galeria.	Cortes horizontais (H) e verticais (V) (adaptado de Bradley, 1999)
5. Execução de um terceiro corte, com a roçadora, equidistante dos dois cortes verticais já efectuados, a passar pelo meio da galeria.	
6. Após a realização dos cortes, a talhada a desmontar encontra-se dividida em 4 blocos, os quais estão ligados ao maciço por intermédio de uma face posterior. Para destacar os blocos do maciço são utilizados colchões de água ou ar colocados no corte.	
7. Depois de destacado o primeiro bloco do maciço procede-se à sua remoção utilizando uma pá carregadora ou uma escavadora.	Individualização dos Blocos (adaptado de Fornaro, Bosticco e Biolatti, 1995)

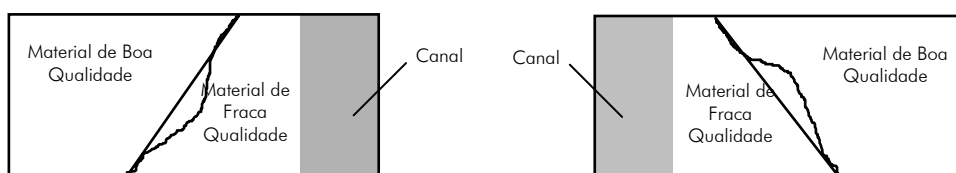
O método apresentado no quadro anterior é muito utilizado em maciços muito sãos, ou seja, de boa qualidade ornamental e com poucas fracturas, permitindo a extracção de blocos na frente já esquadriados e com dimensões comercializáveis adequadas.

Quadro 6.5 - Sequência de operações para desmontar uma talhada de mármore em subterrâneo utilizando a roçadora e a máquina de fio diamantado.

MÉTODO B - ROÇADORA + FIO DIAMANTADO	
1. CORTES	
Descrição	Ilustração
1. Realização do corte horizontal de base ($2 \times 6 m^2$) com a roçadora.	
2. Realização de um corte horizontal do topo a uma altura de 3 m até 4.5 m em relação ao corte anterior com as mesmas dimensões, também com a roçadora;	
3. Execução de três cortes verticais com profundidades de 2 m (podem também ser de 1.5 m) e altura entre 3 e 4.5 m, dependendo da altura fixada para a galeria, com a roçadora. Dois dos cortes delimitam a talhada e um deles, distanciado de cerca de 1 m de um dos lados, define o canal.	Cortes horizontais (H), verticais (V) e posteriores (P) (adaptado de Bradley, 1999)
4. Realização do primeiro corte posterior do canal com a máquina de fio diamantado.	
5. Remoção do mármore constituinte do canal com o recurso à pá carregadora ou à escavadora.	
6. Execução do corte posterior da massa de maior dimensão com a máquina de fio diamantado.	
7. Remoção da massa utilizando as fracturas naturais. Caso contrário não seja possível procede-se primeiro a uma divisão da massa em blocos transportáveis com recurso à máquina de fio diamantado.	Corte posterior com fio diamantado (adaptado de Fornaro, Bosticco e Biolatti, 1995)

A grande vantagem desta técnica (método B), relativamente ao método anterior (método A), reside no facto de se individualizarem totalmente os blocos, sem recorrer a fenómenos de fracturação, para destacar os blocos do maciço (primeiro bloco da talhada), ilustrados na Figura 6.13.

Figura 6.13 – Superfície de rotura do bloco de rocha na frente de desmonte, devido à acção dos colchões hidráulicos ou pneumáticos.

O recurso à combinação da roçadora com a máquina de fio diamantado, apresenta ainda outras vantagens que, no caso do Anticlinal de Estremoz, tem bastante interesse, dada a presença frequente de fracturação e de vergadas xistentas. Essas vantagens prendem-se com o facto desta técnica permitir diversas configurações (selectividade), relativamente aos cortes a realizar, em função da qualidade do material a desmontar e da sua distribuição na frente, tal como se pode observar na Figura 6.14.

A. Canal realizado à direita devido à presença de material de fraca qualidade nesse lado

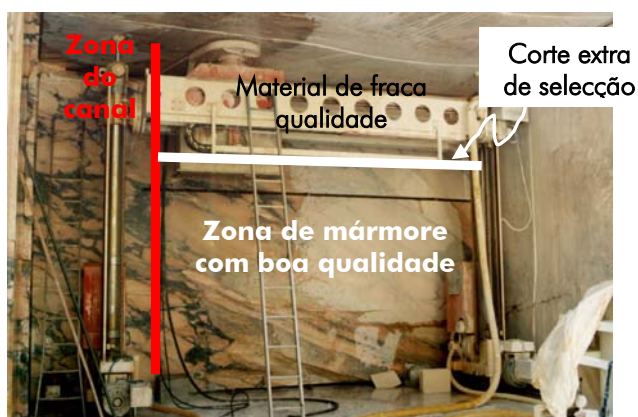
B. Canal realizado à esquerda devido à presença de material de fraca qualidade nesse lado

C. Selecção do mármore de boa qualidade na frente através de um corte extra que possibilita uma forma mais apropriada, evitando possíveis danos devido a acções de remoção

Figura 6.14 – Várias posições do canal na frente da galeria em função da qualidade do mármore.

Na operação de rebaixamento do piso procede-se do mesmo modo tal como apresentado, anteriormente, no capítulo 3.4 para o céu aberto, recorrendo à operação de perfuração, corte com fio diamantado e derrube de talhadas, podendo utilizar a roçadora de bancada para a

realização dos cortes de levante. Na figura seguinte apresenta-se o aspecto de uma exploração subterrânea que se encontra em fase de rebaixamento.

Figura 6.15 – Exploração subterrânea do Anticlinal de Estremoz, em fase de rebaixamento.

6.3.1.2. OPERAÇÕES AUXILIARES

As operações auxiliares são aquelas que não intervêm directamente no processo produtivo mas que interferem indirectamente com este. Deste conjunto de operações serão seguidamente apresentadas aquelas que assumem elevada importância nos desmontes em subterrâneo, nomeadamente: a ventilação, a drenagem e a iluminação.

6.3.1.2.1. Ventilação

A ventilação dos desmontes de mármore em subterrâneo, deve ser estudada com vista a proporcionar aos trabalhadores atmosferas adequadas que permitam uma boa renovação do ar, de modo a evitar a presença de fumos produzidos pelos equipamentos (pás carregadoras, escavadoras giratórias e *dumpers*). Contudo, dada a predominância de equipamentos eléctricos no desmonte (roçadora e máquina de fio diamantado) não é necessário um sistema de ventilação muito potente.

A limitação da concentração de monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de enxofre e nitrogénio, motivado pelo funcionamento dos equipamentos a diesel, deve ser realizada dado que estes compostos são nocivos para o organismo humano.

Os sistemas de ventilação a adoptar numa exploração subterrânea podem ser de dois tipos:

Ventilação natural – quando a circulação do ar se faz naturalmente sem instalação de ventilador, sendo a mesma suficiente para satisfazer as necessidades de ar em face dos parâmetros anteriormente referidos;

Ventilação artificial – quando se torna necessária a instalação de ventiladores para promover a circulação do ar de modo a satisfazer as necessidades. Dentro desta classe podem ser definidos dois tipos de ventilação:

Ventilação insuflante – é injectado ar fresco directamente na frente, o que evita a contaminação do ar que chega à zona de desmonte;

Ventilação aspirante – é criada uma depressão na frente que faz com que o ar existente nas cavidades de desmonte afluía à frente. Possui a desvantagem de fazer chegar à zona de desmonte ar já contaminado.

Na Figura 6.16 ilustram-se os dois tipos de ventilação artificial que se podem utilizar em explorações subterrâneas de mármore.

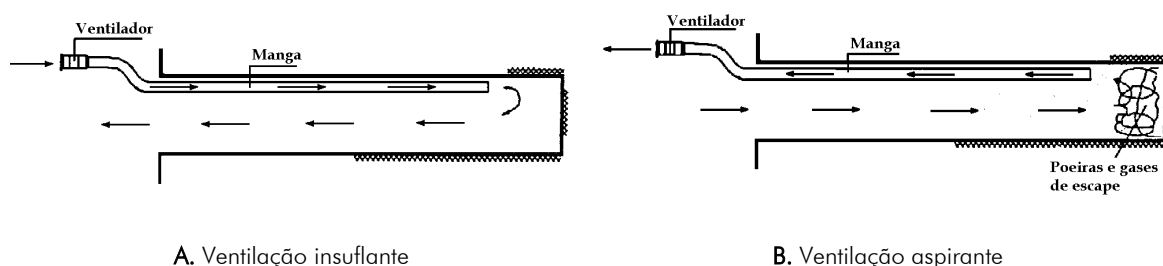



Figura 6.16 – Esquemas ilustrativos da ventilação insuflante e aspirante.

Como, regra em geral, as explorações subterrâneas de mármores partem de um flanco de encosta ou de uma exploração a céu aberto, sempre que os mesmos não avancem demasiado para o interior da jazida ,durante os trabalhos iniciais, e que a circulação de ar seja boa, e evidentemente que a presença de equipamentos a diesel não seja muito frequente, é dispensável a utilização de ventilação artificial. Caso contrário, quando a atmosfera se apresenta viciada ou poluída, deve ser instalada ventilação artificial que melhore essa situação. Geralmente, a ventilação insuflante é a mais utilizada nas explorações de mármore em subterrâneo em virtude de não existirem grandes concentrações de gases ou poeiras nas frentes de desmonte.

De acordo com a legislação mineira portuguesa, o caudal de ventilação, natural ou artificial, deverá ser suficiente para fornecer no mínimo 50 l/s de ar fresco por cada homem presente no turno mais numeroso. A utilização de equipamentos a diesel faz acrescer ao valor anterior 35 l/s por cada CV de potência dos equipamentos a diesel que funcionem no espaço subterrâneo.

Para explorações já em laboração, os caudais existentes podem ser estudados com base em avaliações *in situ* através de equipamentos próprios (anemómetros). Na fase de projecto e para dimensionar o sistema de ventilação necessário, devem ser considerados os seguintes aspectos (Fornaro e Bosticco, 1994a):

- Geometria das escavações;
- Número e tamanho das entradas;
- Localização das aberturas em relação à morfologia do terreno;
- Condições climatéricas no exterior;
- Número de trabalhadores;
- Número e tipo de equipamentos poluentes que operam no interior.

Na Figura 6.17 apresenta-se o exemplo de um ventilador insuflante instalado numa pedreira subterrânea.

Figura 6.17 – Ventilador insuflante instalado na entrada de uma exploração subterrânea de rochas ornamentais.

(fonte: Fornaro e Bosticco, 1994a)

6.3.1.2.2. Iluminação

A iluminação deve ser outra das preocupações a ter em conta na fase de projecto de uma exploração de mármores em subterrâneo, de modo a garantir a realização dos trabalhos, em segurança. No que concerne a esta operação deve garantir-se uma distribuição uniforme da luz no interior dos trabalhos, atendendo às características reflectoras das paredes e chão das galerias (Fornaro e Bosticco, 1994a).

Os trabalhos a realizar no interior das cavidades podem ser considerados como tarefas visuais ligeiras, que não exigem grande esforço, pelo que a iluminância a instalar deve centrar-se na ordem dos 120-250 lux (de acordo com a norma DIN 5035). Nas zonas de passagem onde não se realizam trabalhos, estes valores podem baixar para a ordem dos 30-60 lux.

Os sistemas que, geralmente, são aplicados nas explorações subterrâneas de rochas ornamentais utilizam:

- Lâmpadas fluorescentes (alturas até 5 m)
- Holofotes de sódio-vapor (alturas superiores a 5 m)

As lâmpadas incandescentes não são muito utilizadas em virtude de apresentarem um rendimento luminoso baixo, relativamente à potência que consomem, e pelo facto da sua vida ser relativamente curta.

A potência a instalar para as lâmpadas fluorescentes e para os holofotes deve depender das características reflectoras do piso e das paredes da escavação e do tipo de local onde se pretende instalar o sistema de iluminação (são comuns holofotes de 1000 a 1500 W de potência).

Para averiguar a eficácia do sistema de iluminação instalado, podem ser realizadas avaliações do nível de iluminância através de um instrumento denominado luxímetro. Com estas avaliações é possível optimizar, caso se revele necessário, o sistema de iluminação com a instalação de novas fontes de luz. Na Figura 6.18 apresenta-se um holofote móvel que pode ser utilizado para fazer

face à necessidade de iluminação em determinadas zonas dos desmontes, onde os trabalhos requerem uma melhor visibilidade.

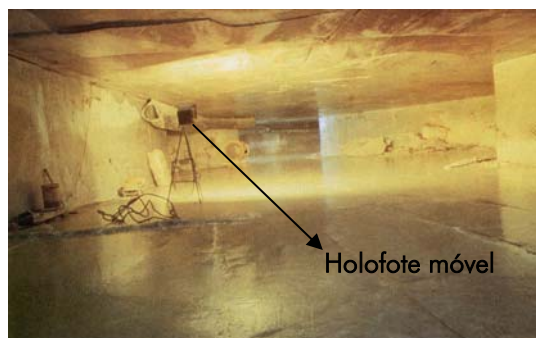



Figura 6.18 – Holofote móvel utilizado para iluminar zonas de trabalho que requerem um nível de iluminação superior ao normal.
(fonte: Fornaro e Bosticco, 1994a)

De modo a fazer face a uma falha de energia, devem existir sistemas de iluminação de segurança que permitam aos trabalhadores orientarem-se no interior da escavação.

6.3.1.2.3. Drenagem

Na zona do Anticlinal de Estremoz, e porque as explorações se desenvolvem em poço, a drenagem das águas que afluem à exploração, bem como os esgotos da água utilizada nos desmontes, devem merecer planeamento na fase de projecto. A presença de água nestas explorações podem trazer problemas quer em termos da produção, quer ao nível da segurança. Deste modo, devem ser prevenidas situações de inundações, que motivariam possíveis danificações de equipamentos e problemas de segurança para os trabalhadores. Por outro lado, há que garantir a existência de água com limpidez adequada para utilização nas actividades industriais dado que, no Alentejo, e principalmente no Verão, a água escasseia.

Simultaneamente, há que zelar pela protecção da qualidade da água evitando, quer a sua poluição, através de um tratamento e encaminhamento adequado, quer ainda situações de lixiviação de fracturas ou outras, que poderão motivar instabilidade do maciço rochoso.

Assim, devem ser tomadas medidas, atendendo às características hidrogeológicas da zona onde se pretende abrir a escavação subterrânea, de entre as quais se destacam:

Esgotos

- Condução da água utilizada industrialmente para caixas de recolha deixando para tal uma ligeira inclinação nos pisos da exploração, de modo a que esta se encaminhe para estas naturalmente;
- Bombagem de água para tanques de decantação para poder ser regenerada e reutilizada;

- Existência de depósitos de armazenamento de água limpa regenerada e proveniente das chuvas, de captações ou de outras fontes (furos de sondagem, etc.).

Afluentes

- Condução da água que aflui à exploração para caixas de armazenamento, a partir das quais é bombeada para tanques de decantação ou directamente para linhas de água superficiais (de modo a não promover o reencaminhamento para o interior da exploração);
- A capacidade de bombagem instalada deve prever situações de cheias, pelo que deve existir, no mínimo, uma bomba suplente para entrar em funcionamento nessas situações;
- A capacidade de bombagem deve ser projectada com dados recolhidos em estudos efectuados no local ou em pedreiras vizinhas, analisando a situação destas em relação à pedreira na qual se pretende abrir a exploração subterrânea (diferença de nível de base).

Qualidade da Água

- Evitar o contacto da água com elementos contaminantes, nomeadamente óleos ou outros poluentes, que podem contaminar os aquíferos da região.

Estabilidade

- Condução da água nas zonas periféricas da exploração de modo a minimizar a infiltração na área da exploração subterrânea;
- Bombagem da água em zonas estratégicas.

6.3.2. DEFINIÇÃO DOS RECURSOS

Para manter em produção uma exploração subterrânea de mármores é necessário disponibilizar vários recursos, nomeadamente tecnológicos, humanos, instalações de apoio, energia eléctrica, abastecimento de água, ferramentas e consumíveis. Os recursos tecnológicos e humanos são dos mais importantes, sendo por isso objecto de estudo nos capítulos seguintes.

6.3.2.1. EQUIPAMENTOS

Para proceder ao desmonte de rocha é necessário efectuar um conjunto de operações sequenciais nas quais se empregam diversos tipos de equipamentos, tal como já se teve oportunidade de apresentar no capítulos 6.3.1.1.

O equipamento que assume maior protagonismo na exploração subterrânea de mármores é, sem dúvida, a roçadora de galeria, a qual permite realizar os cortes verticais e horizontais que definem o contorno das galerias e as talhadas a desmontar. Actualmente, existem no mercado dois tipos de roçadoras de galeria, a roçadora de cadeia e a de cinta diamantada. Estas duas roçadoras apresentam algumas diferenças, das quais se destacam as apresentadas no Quadro 6.6.

Quadro 6.6 – Principais diferenças entre os dois tipos de roçadora de galeria.

ROÇADORA DE CADEIA	ROÇADORA DIAMANTADA
• Bons desempenhos no corte • Não possui meio de locomoção • Mais difícil de nivelar • Mais poluente (necessita de lubrificação) • Não necessita de muita água durante o corte	• Baixos desempenhos no corte de rochas duras • Possui meio de locomoção • Fácil de preparar e nivelar • Menos poluente • Necessita de muita água durante o corte
ILUSTRAÇÕES	

Para além da roçadora, são necessários outros equipamentos para promover o desmonte da rocha em subterrâneo, dos quais se destacam a máquina de fio diamantado (corte e esquartejamento), os colchões hidráulicos ou pneumáticos (derrube), a pá carregadora ou a escavadora giratória (remoção), os martelos pneumáticos (esquartejamento), a pá carregadora (transporte de blocos), a grua (extracção de blocos e de escombros) e os *dumpers* (transporte de escombros).

Para além destes equipamentos, são necessárias algumas ferramentas, nomeadamente poleias para passagem do fio diamantado nos cortes posteriores da talhada, rolos metálicos para o corte horizontal inferior, possibilitando o deslizamento do bloco depois de individualizado, cunhas metálicas, para colocar em determinados cortes de modo a evitar que estes se fechem, entre outros.

Os equipamentos referidos encontram-se descritos com mais pormenor no Anexo VI, no qual se apresentam algumas características produtivas (velocidades de corte, consumos, etc.). No caso da exploração em subterrâneo resultar de um desmonte a céu aberto, deve ser equacionada a utilização dos equipamentos existentes no novo método de desmonte e só adquirir aqueles que realmente são necessários, tal como a roçadora de galeria.

6.3.2.2. RECURSOS HUMANOS

O desmonte em subterrâneo não envolve muitos trabalhadores por frente, sendo necessários os seguintes recursos humanos:

1 Engenheiro (supervisionar os trabalhos)
1 Encarregado (gestão dos trabalhos)
1 Operador da roçadora (tempo inteiro)
1 Ajudante do Operador (nas mudanças do equipamento)
1 Condutor Manobrador (remoção dos blocos cortados na frente)

O engenheiro deve supervisionar os trabalhos, recolher informações durante os avanços e zelar pelo cumprimento do Plano de Lavra aprovado, devendo delegar no encarregado a gestão dos trabalhos diários, após lhe ter comunicado as suas preocupações. Não é necessário que esteja sempre presente na pedreira devendo, no entanto, ir à exploração pelo menos uma vez por semana.

O encarregado está omnipresente na exploração e deve ser capaz de pôr em prática as indicações do engenheiro e, ao mesmo tempo, organizar o trabalho de modo a maximizar a produção, não necessitando de estar sempre na mesma frente.

O operador da roçadora deve ser capaz de manobrar o equipamento durante os cortes e na montagem para novos cortes. Pode ainda tomar parte noutras operações de corte de rocha com outros equipamentos, tal como a máquina de fio diamantado, com vista a concluir a individualização da talhada. Este trabalhador passará o turno de trabalho na mesma frente de desmonte subterrâneo.

O ajudante deve receber instruções do operador da roçadora durante as fases de montagem e alinhamento das máquinas de corte (roçadora e máquina de fio diamantado). Deve ser também responsável por colocar cunhas nos rasgos, rolos metálicos ou outros, no sentido de levar a bom termo o desmonte da massa marmórea. O ajudante deverá estar a maioria do tempo junto do operador da roçadora, embora não necessite de aí permanecer na fase de corte.

O condutor manobrador deverá ser chamado para remover os blocos após a sua individualização, movimentar os equipamentos e limpar algumas zonas. Caso contrário não necessita de estar na zona da galeria.

Na fase de rebaixo da galeria, os mesmos trabalhadores são, geralmente, suficientes para realizar o desmonte, embora neste caso o operador da roçadora opere com a roçadora de bancada, e o ajudante realize a perfuração necessária para passar o fio diamantado, o que não ocorria na fase de escavação em galeria.

Dependendo das características da pedreira poderá, eventualmente, ser necessário recorrer a outros trabalhadores, tais como o gruista (extracção dos blocos do fundo da exploração), condutor de *dumper* (transporte do material estéril para a escombreira), etc.

6.3.3. SEGURANÇA E HIGIENE

A exploração subterrânea, à semelhança da exploração a céu aberto, embora com algumas diferenças específicas, deve cumprir um conjunto de requisitos legais e normativos em vigor com vista à minimização dos acidentes de trabalho e das doenças profissionais. Assim, devem ser projectadas várias medidas, de entre as quais se salientam as seguintes:

- Serviços de segurança, higiene e saúde no trabalho que assegurem o acompanhamento dos trabalhos a este nível, auxiliando na sinalização a instalar, na adopção de medidas de protecção colectiva e individual, na análise dos riscos inerentes à actividade, na informação e sensibilização dos trabalhadores para os riscos a que estão expostos, e que avaliem a aptidão clínica dos trabalhadores para o cargo que desempenham, entre outras.
- Sinalização adequada, de informação (nome da pedreira, número de licenciamento, responsável técnico, etc.), de perigo (queda de objectos, etc.), de obrigação (uso de capacete, uso de botas, etc.) e de emergência (localização do estojo de primeiros socorros, posicionamento de extintor, etc.).
- Medidas e equipamentos de protecção colectiva em detrimento das medidas de protecção individual, sempre que tal seja possível.
- Equipamentos de protecção individual para os trabalhadores de modo a que estes fiquem protegidos dos riscos "parasitas" existentes no seu posto de trabalho (ex.: queda de pedras das paredes ou tecto, etc.).
- Um socorrista por cada 20 trabalhadores e dispor de estojos e equipamentos de primeiros socorros adequados (maca, cobertor, talas, garrotes, fármacos, etc.) e de um espaço devidamente preparado para prestar os primeiros socorros em caso de acidente.
- Equipamentos de emergência, nomeadamente meios de combate a incêndio (extintores), telefone, entre outros.
- Instalações sociais e de higiene, respectivamente, refeitório, sanitários, vestiários e duches, com as dimensões e equipamentos adequados ao número de trabalhadores, de acordo com as normas vigentes.
- Avaliar periodicamente o ruído a que os trabalhadores estão expostos, com a periodicidade recomendada pela legislação em vigor nesta matéria.
- Plano de segurança e saúde a ser elaborado antes da exploração se iniciar, de acordo com a legislação vigente.

A realização de trabalhos de desmonte de rocha em subterrâneo acarreta alguns riscos diferentes dos trabalhos a céu aberto, nomeadamente:

- Maior probabilidade de queda de objectos (pedras ou blocos individualizados);
- Nível de ruído superior (devido à reflexão nas paredes e tecto da cavidade);
- Maior concentração de poeiras e de gases dos equipamentos (atmosfera restrita);
- Menor visibilidade (iluminação natural com menor intensidade ou recurso a iluminação artificial);
- Espaço mais limitado (sobretudo na fase inicial da entrada em galeria).

As principais causas de acidentes em explorações subterrâneas de mármore, de acordo com Fornaro e Bosticco (1994a) resultam da rotura do fio diamantado (projecção de pérolas, chicotadas do cabo), dos entalamentos nas máquinas e da cedência dos equipamentos por inadequada instalação.

Para evitar a ocorrência de acidentes, devem ser previstas verificações periódicas dos equipamentos, das ferramentas, dos pontos de fixação, e a formação dos trabalhadores antes de operarem com o equipamento. Para combater o risco nas explorações subterrâneas de rocha ornamental, é essencial a educação e a informação do pessoal. Os trabalhadores devem ser alertados para o facto de serem agentes activos da segurança das explorações. Por mais protecção que se instale e barreiras que se ergam contra o risco, se as pessoas não tiverem sensibilidade para esta questão, tudo o que possa ser feito nunca atingirá, de um modo global, os objectivos pretendidos. Não se quer com isto dizer que a educação dos trabalhadores é, por si só, suficiente para eliminar todos os riscos, pois isso seria pura demagogia. Será necessário conjugar este aspecto com a utilização de tecnologias mais seguras e de protecções colectivas adequadas a cada caso, para que efectivamente se minimizem os riscos desta actividade.

A utilização da roçadora permite um significativo avanço em matéria de segurança, pois é uma tecnologia de corte relativamente segura, em comparação com a máquina de fio diamantado. Tal como se viu ao longo deste estudo, a roçadora de bancada pode substituir o corte com fio diamantado, o que apresenta vantagens em termos de segurança, evitando, por outro lado, o elevado ruído característico da operação de perfuração (necessária à passagem do fio diamantado), efectuada com a perfuradora e os martelos pneumáticos.

Em termos de segurança, e mais uma vez, é de extrema importância evitar a acumulação de fumo e de poeiras no interior das cavidades, devido à circulação de máquinas ou a operações de perfuração. Para resolver esta situação há que dimensionar as redes de ventilação e, se necessário, instalar ventiladores capazes de manter o ar no interior da galeria em condições respiráveis e adquirir equipamentos que poluam o menos possível. Isto poderá passar, futuramente, pela utilização de um maior número de equipamentos movidos a energia eléctrica, evitando os gases resultantes da combustão do gasóleo. Nos equipamentos a diesel deve ser dada preferência a equipamentos munidos com catalisadores, que convertem os hidrocarbonetos não queimados e o monóxido de carbono em dióxido de carbono e água.

Também a iluminação é fundamental para a segurança, devendo esta ser assegurada de modo a permitir a realização das operações em condições de visibilidade suficiente. Para se conseguir uma boa iluminação que promova a segurança no interior da exploração subterrânea, deve ser tida em consideração a iluminação adequada das frentes de trabalho e das vias de circulação e facultar aos trabalhadores fatos reflectores, quando tal se justifique.

Relativamente à queda de blocos, deve ser realizado um adequado saneamento das frentes de desmonte e/ou instalar sustimento adequado com vista a evitar acidentes. A este nível, deve ainda ter-se atenção a fenómenos de "sobre-extracção" que podem resultar numa diminuição da secção

dos pilares e numa consequente redução da sua capacidade de suporte, o que poderia colocar em causa a continuidade dos trabalhos e, principalmente, a segurança dos trabalhadores.

No que diz respeito aos equipamentos de protecção individual que devem ser facultados e utilizados pelos trabalhadores, são os seguintes:

- Capacete
- Botas com biqueira de aço
- Botas impermeáveis com biqueira de aço
- Luvas
- Fato impermeável
- Protectores auriculares (equipamentos de perfuração)
- Máscaras (perfuração a seco)
- Barras reflectoras nos fatos de trabalho
- Óculos de protecção dos olhos (perfuração e colocação de pregagens e ancoragens)
- Outros equipamentos (de acordo com o trabalho que o operário exercer)

No que concerne à segurança e higiene, o empresário deve conhecer e cumprir a lei em vigor, devendo para isso ser auxiliado pelos técnicos de segurança e higiene da empresa. O responsável técnico deve realizar os trabalhos respeitando as regras de segurança e responder a par do empregador pelos acidentes que possam ocorrer na exploração. Os trabalhadores devem cooperar nesta matéria e respeitar as regras de segurança internas da empresa, utilizando os equipamentos de protecção individual e funcionando como elementos activos de segurança. Por fim, os técnicos de segurança e higiene internos ou externos, deverão informar o empregador e o responsável técnico para as suas obrigações legais, recomendando medidas de prevenção de riscos e acompanhando a sua eficácia. Devem ainda dialogar com os trabalhadores sobre as questões de segurança que se colocam, e sensibilizá-los para a conduta correcta a tomar nas diversas situações de risco com que se deparam.

7. MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DA ESTABILIDADE

7.1. PROGRAMA DE ACTIVIDADES

Com base no Quadro 5.1, referente ao programa global de actividades a desenvolver no âmbito da metodologia que vem sendo apresentada neste estudo para abertura de uma exploração subterrânea de mármores, é possível observar, na Figura 7.1, as actividades a desenvolver na fase 3 dessa mesma metodologia, respeitante aos trabalhos de monitorização dos desmontes e de controlo da estabilidade do maciço marmóreo.

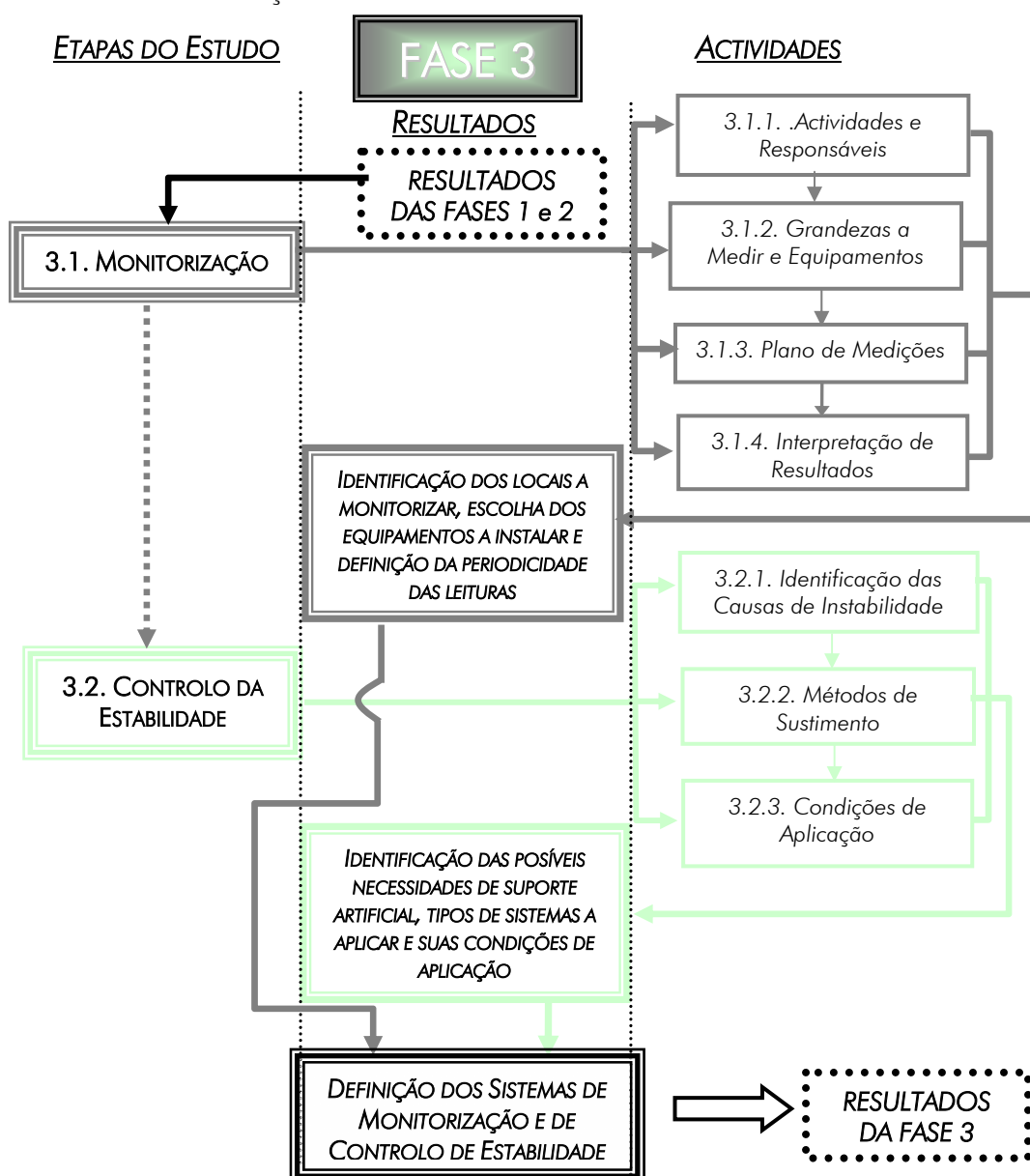



Figura 7.1 – Fluxograma da fase 3 (monitorização e controlo da estabilidade) do estudo para abertura de uma exploração subterrânea de mármores.

7.2. MONITORIZAÇÃO

A monitorização dos desmontes reveste-se de grande importância nas explorações mineiras subterrâneas, dado ser necessário manter as condições de segurança e estabilidade pois, como tem sido mencionado ao longo deste estudo, ao escavar o maciço as condições preexistentes alteram-se e o estado de tensão em redor da cavidade modifica-se. Os resultados dessa alteração podem, e devem, ser avaliados para que não existam surpresas desagradáveis no que concerne à estabilidade do maciço. Para tal, deve ser realizado um conjunto de actividades com vista à definição do tipo de monitorização a efectuar, as quais se encontram apresentadas no Quadro 7.1, e serão objecto de estudo nos capítulos seguintes.

Quadro 7.1 - Acções a desenvolver e resultados a obter com as actividades de monitorização dos desmontes.

ETAPA 3.1 – MONITORIZAÇÃO		
ACTIVIDADE	*ACÇÕES/MEIOS*	*RESULTADOS A OBTER*
3.1.1. Actividades e Responsáveis *3.1.2. Grandezas a Medir e Equipamentos* *3.2.3. Plano de Medições* *3.2.4. Interpretação de Resultados*	Estudo das grandezas a medir, e dos locais de medição Levantamento dos instrumentos existentes no mercado	Definição do programa de instrumentação Identificação dos locais a serem instrumentados Definição dos equipamentos de medida a utilizar em cada caso Definição do programa de leituras para cada equipamento Definição de critérios para interpretação de resultados

A instrumentação a aplicar nos desmontes subterrâneos de mármore deve permitir detectar situações anómalas ao nível da estabilidade e, ao mesmo tempo, actuar com vista à preservação da segurança e das características de explorabilidade do recurso mineral, evitando, a este nível, o aparecimento de fracturação indesejada que poderia pôr em causa a viabilidade da exploração.

Os principais objectivos da instrumentação nos trabalhos subterrâneos são os seguintes (Hoek e Brown, 1980):

- Antes da abertura – recolher informação para o projecto de engenharia (ex. tensões *in situ*, resistência e deformação do maciço rochoso);
- Durante os trabalhos da escavação – confirmar a realidade do projecto elaborado e estudar a estabilidade do maciço com vista à garantia de segurança;
- Após o abandono da escavação – avaliar o comportamento do maciço rochoso face à escavação, com vista à preservação da sua estabilidade e/ou avaliar a sua interacção com escavações próximas.

Para elaborar o plano de instrumentação e monitorização da exploração deve atender-se aos seguintes aspectos (baseado em Cunha e Fernandes, 1980):

- Localização da exploração - a profundidade e o meio onde se insere condiciona o tipo e a densidade de instrumentação a utilizar.
- Características geotécnicas – a litologia, a hidrogeologia, a fracturação, e as características geomecânicas do maciço condicionam o tipo e a frequência de instrumentos a instalar, bem como a periodicidade das leituras.
- Método de desmonte e ritmo de avanço – estes aspectos condicionam o tipo e o ritmo de instalação dos equipamentos e, ainda, a periodicidade das leituras.

Apesar de necessária, a instrumentação nem sempre consegue atingir os objectivos para os quais foi projectada, devido a várias causas que, segundo Lane (1975), *in* Hoek e Brown (1980), estão relacionadas com os seguintes aspectos:

1. Falta de um plano prévio contendo o tipo de informação necessária e as variáveis que vão ser medidas de acordo com os dados geológicos e os métodos de desmonte.
2. A programação da instalação e leitura do equipamento não foi adequadamente definida. Os instrumentos são instalados tardiamente e/ou não se podem obter leituras devido a dificuldades de acesso.
3. Inexperiência da equipa para reconhecer situações de perigo, ao nível do comportamento do maciço rochoso.
4. Não é realizada uma avaliação e interpretação imediata no campo durante as leituras. Este atraso impede, em muitos casos, que se actue preventivamente e, muitas vezes, os resultados da interpretação não são os mais correctos dada a falta de informação das condições de campo.
5. Avaria dos equipamentos durante as operações de desmonte.
6. Instrumentação inadequada.
7. A responsabilidade da entidade contratada não está bem definida, o que resulta no não cumprimento da periodicidade das leituras e na sua interpretação fora do tempo.
8. Contenção de custos que resulta numa precária recolha de informação, análise e interpretação de resultados.

Para que estes aspectos não sucedam, deve estar-se atento e incorporar na fase de projecto as medidas correctas que garantam o atingir dos objectivos propostos.

7.2.1. ACTIVIDADES E RESPONSÁVEIS

Durante a monitorização dos desmontes devem ser realizadas várias actividades, as quais serão levadas a cabo por uma equipa que terá a seu cargo a responsabilidade da monitorização. No fluxograma da Figura 7.1 apresentam-se, de um modo esquemático, as diversas actividades que devem ser consideradas na fase de projecto e que devem ser realizadas pela equipa responsável pela monitorização e instrumentação dos trabalhos de desmonte de mármore.

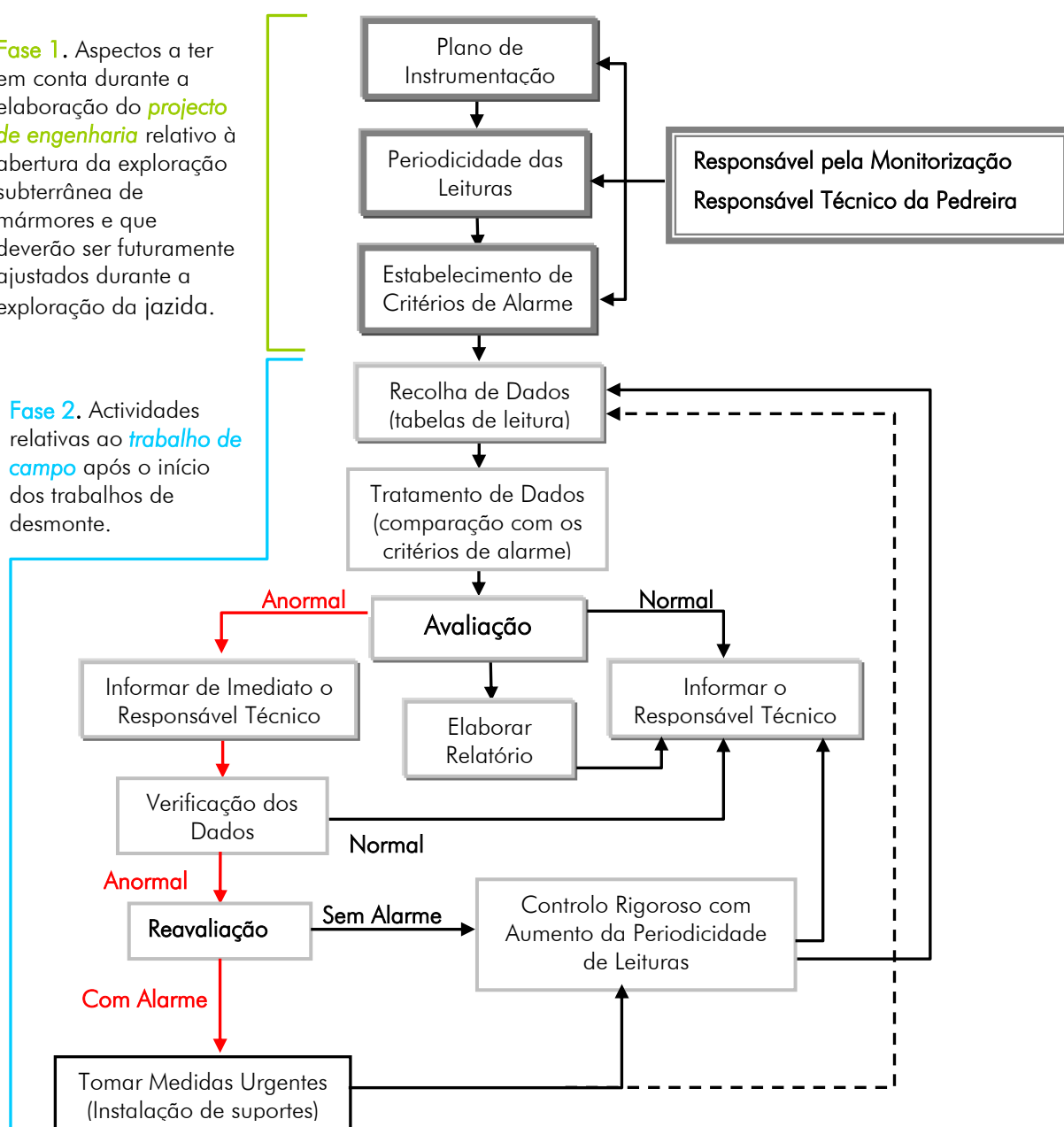



Figura 7.2 – Fluxograma das actividades de monitorização dos desmontes.

Atendendo à figura anterior é possível verificar que durante a **fase de projecto** se devem tentar identificar as grandezas a avaliar, os locais a monitorizar e os equipamentos a utilizar, com vista à definição de um plano de instrumentação. Este plano será futuramente ajustado em função dos fenómenos presentes nas cavidades, pelo responsável técnico da exploração e pelo responsável pela monitorização (que podem ser a mesma pessoa). Também na fase de projecto devem ser sugeridas periodicidades de medição para cada instrumento e definidos critérios de alarme para os vários tipos de causa de rotura presentes no maciço rochoso.

Na **fase de campo** devem ser seguidos os passos indicados no fluxograma, devendo o responsável técnico da exploração ser informado, permanentemente, dos resultados obtidos. Para tal, deverão ser elaborados relatórios periódicos e, sempre que surja uma situação anormal, este deve ser

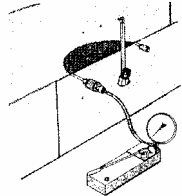
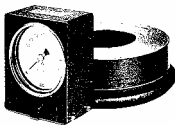
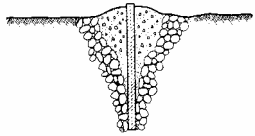
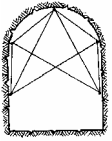
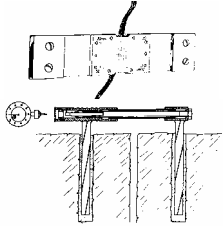
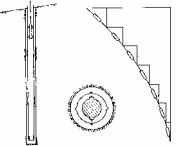
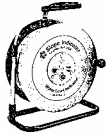
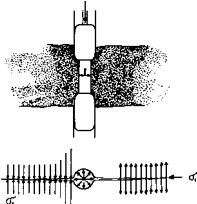
chamado de imediato à exploração para se inteirar da situação e dialogar com a equipa responsável pela monitorização, com vista a decidir sobre as medidas a tomar.

O planeamento da monitorização dos trabalhos de desmonte deve ser da responsabilidade de um engenheiro com experiência em tais actividades, devendo esse planeamento ser discutido com o responsável técnico pela exploração. Estes trabalhos poderão ser efectuados por técnicos especializados nesta área, assessorando o engenheiro responsável. A responsabilidade da fiscalização de todas as actividades de instrumentação deve estar a cargo do responsável técnico da pedreira.

A equipa responsável pela instrumentação deve ser capaz de realizar as actividades que seguidamente se indicam, além de outras que possam ser acordadas:

- Fornecimento e instalação dos instrumentos consignados no plano de instrumentação;
- Execução de leituras com periodicidade adequada ao estado da exploração e aos resultados das leituras anteriores;
- Observações (recurso a fotografias e a filmagens) de natureza qualitativa da geologia dos terrenos escavados (ex.: natureza dos terrenos, fenómenos geológicos que o caracterizam, estado de fracturação, presença de água, etc.);
- Conservação, manutenção e calibração dos aparelhos de leitura;
- Tratamento dos dados, através da elaboração de gráficos interpretativos e de quadros de leitura;
- Avaliação prévia e sumária dos resultados obtidos, sem prejuízo da análise a realizar pelo responsável técnico da exploração;
- Informação imediata do responsável técnico quando se atinjam valores de alarme;
- Elaboração de relatórios periódicos.

7.2.2. GRANDEZAS A MEDIR E EQUIPAMENTOS

As grandezas a medir devem ser definidas em função dos riscos existentes, neste tipo de escavações subterrâneas, ao nível da estabilidade dos desmontes. Assim, é necessário ter presente que as principais manifestações de rotura estão ligados aos seguintes aspectos:

- Assentamentos superficiais;
- Rotura nas superfícies das frentes de desmonte;
- Deslizamento de taludes por descompressão ou por desprendimento de blocos;
- Colapso dos elementos de suporte por carregamento excessivo.

No Anexo VII apresentam-se com mais detalhe as principais causas de instabilidade que se podem registar em pedreiras subterrâneas de mármore.

Para poder prever essas situações de instabilidade é necessário colocar instrumentos adequados em locais próprios, que permitam prever situações de colapso antes destas acontecerem, de modo a poder actuar preventivamente.

As grandezas a medir e os equipamentos que podem ser utilizados para a monitorização e instrumentação das cavidades subterrâneas de mármores encontram-se descritos no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Grandezas a medir e equipamentos a utilizar na monitorização de cavidades.

GRANDEZA A MEDIR	APARELHO	LOCAL DE INSTALAÇÃO	ILUSTRAÇÃO
Medição de tensões no maciço e nos pilares	Células de pressão total, macacos planos de pequena área (SFJ), ou outro dos métodos descritos no capítulo 5.3.1.3	Nas frentes de desmonte, nas paredes, nos pisos e nos pilares abandonados	
Medições de carga nas ancoragens	Células de carga	Na cabeça da ancoragem entre a chapa de distribuição de carga e o contorno da escavação	
Deslocamentos à superfície	A avaliação destes deslocamentos é realizada com um teodolito sobre marcas topográficas ou pernos	As marcas topográficas ou pernos são colocados dentro e fora da zona de influência da escavação de modo a possibilitar a avaliação dos movimentos absolutos	
Convergências (deformação do contorno da escavação)	Convergenciómetro (de haste, de fita e através de levantamento óptico)	São instaladas marcas numa secção da cavidade, sendo a convergência das cavidades obtida em função da variação das distâncias entre elas	
Controlo da abertura e deslocamento relativo de fracturas	Fissurómetros (eléctricos, "*Tale Tell*", etc.)	Instalados nos bordos das fracturas, atravessando as mesmas	
Deslocamentos no interior do maciço	Extensómetros (simples, múltiplos, etc.)	Instalados em furos de sondagem.	
Deslocamentos horizontais internos	Inclinómetros	Instalados em furos de sondagem	
Nível freático	Piezómetros	Instalados em furos de sondagem	
Microfracturação	Geofones	Estes equipamentos podem ser instalados em furos de sondagem, transmitindo os sinais a sistemas de registo	

De todas as grandezas que se podem medir nos desmonte, a medição de convergências reveste-se de uma importância fulcral pois permite avaliar, de um modo simples e rápido, os deslocamentos relativos nos contornos das cavidades. Trata-se de um método que fornece informação preciosa sobre a estabilidade dos desmontes, devendo por esse facto ser utilizado desde o início da exploração.

Outros métodos importantes são os que permitem o controlo das fracturas e dos deslocamentos que podem ocorrer à superfície, devendo ser instalados numa fase inicial dos desmontes, mal se detectem descontinuidades potencialmente causadoras de instabilidade.

Para escolher os equipamentos a instalar devem ter-se em consideração as suas principais características, em função do local onde se pretendem instalar, devendo a escolha recair atendendo aos seguintes requisitos (Pinto, 1987):

- Versatilidade;
- Adequação à dimensão e duração dos desmontes;
- Precisão;
- Sensibilidade;
- Robustez, atendendo ao local de instalação;
- Tempo de resposta;
- Preço mais baixo.

7.2.3. PLANO DE MEDIÇÕES

O plano de medições, também conhecido como plano de observação, deverá ser definido na fase de projecto, podendo ser objecto de alteração depois de iniciados os trabalhos. Esta definição deverá ser efectuada por pessoas habilitadas para tal, devendo o responsável técnico da exploração tomar parte nesta fase. O plano deve ser projectado atendendo aos princípios da economia e da segurança.

Este plano, que fará parte integrante do Plano de Lavra da exploração, deverá conter as seguintes informações:

a) Identificação dos principais riscos para a estabilidade – as principais causas de instabilidade existentes no caso em estudo devem ser identificadas, com base nos estudos geológicas e geotécnicos realizados e na geometria dos desmontes previamente estabelecida;

b) Definir as grandezas a medir em função desses riscos – devem ser previstos estudos que nos informem sobre a convergência dos contornos das cavidades, dos possíveis deslocamentos à superfície, dos deslocamentos relativos das fracturas, e do desempenho dos elementos de sustimento (pressões nos pilares e cargas nas ancoragens e nas pregagens), entre outros, como é o caso dos movimentos internos do maciço na laje de cobertura que, de acordo com as condições do maciço marmóreo, se considerem necessários monitorizar;

c) **Definir os locais de instalação dos equipamentos** – os locais onde devem ser instalados os equipamentos podem ser pontos isolados (ex.: ancoragem) ou dispostos segundo perfis de monitorização com vista a uma maximização da informação;

d) **Definir os equipamentos a utilizar em cada local** – os tipos de equipamento devem ser definidos em função das grandezas que se pretendem monitorizar, de acordo com a lista apresentada no capítulo anterior;

e) **Estabelecer a periodicidade das leituras para cada equipamento** – a periodicidade das leituras deve ser definida para cada tipo de equipamento, atendendo à localização e importância que este apresenta em termos da estabilidade do maciço. Pode verificar-se a existência de equipamentos iguais na mesma exploração, que por estarem localizados em zonas menos críticas não necessitam de uma periodicidade de leitura tão elevada, como outros que se encontram instalados em zonas críticas (ex.: secções com convergências importantes).

Na figura seguinte apresenta-se, a título de exemplo, um possível plano de instrumentação a implementar numa exploração subterrânea de mármores.

Quadro 7.3 – Plano de medições possível de aplicar aos desmontes de mármore em subterrâneo.

<table>
<tr>
<td>
<u>Macacos Planos ("SFJ")</u>
- Existência de rasgos nos pilares centrais com as respectivas bases extensométricas.
- Medições quinzenais a mensais.

<u>Marcas Topográficas</u>
- Devem ser colocadas à superfície, na área em escavação e na sua envolvente.
- Medições quinzenais a mensais.

<u>Extensómetro (simples ou múltiplo)</u>
- Devem ser instalados no tecto da escavação na zona central.
- Medições quinzenais a mensais.

<u>Fissurómetros</u>
- Instalar fissurómetros eléctricos nos locais inacessíveis e mecânicos ou de régua nos outros.
- Medições diárias a semanais.

<u>Secções de Convergência</u>
- Devem ser instaladas bases de medição nas secções centrais da escavação.
- Medições semanais a quinzenais.
</td>
<td>
POSICIONAMENTO DOS INSTRUMENTOS

</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">Nota: A frequência de medições indicada para cada tipo de instrumento é a provável, embora a mesma seja função das características do local onde o equipamento está instalado, das condições de estabilidade do maciço, do avanço dos trabalhos, da dimensão dos desmontes, entre outros, pelo que deve ser definida caso a caso.</td>
</tr>
</table>

No momento da instalação dos instrumentos devem ser efectuadas várias leituras para determinar o valor da leitura inicial estabilizada. Todas as medições futuras serão realizadas em relação ao valor da leitura inicial, sendo o resultado destas dado pela diferença entre o valor da leitura num determinado momento e o valor inicial. A evolução desta diferença informa sobre o comportamento do maciço no que diz respeito à grandeza avaliada.

Mal se verifique que os valores das medições apresentam tendência para a estabilização e não existem alterações na cavidade junto da zona de instalação dos aparelhos, então a periodicidade das medições pode ser reduzida, e vice versa. Como primeira aproximação neste tipo de actividades, a periodicidade das leituras pode ser definida do seguinte modo:

- 1 medição diária durante as primeiras duas semanas;
- 2 medições por semana até ao fim do primeiro mês;
- 1 medição por semana até ao fim do segundo mês;
- 1 medição por mês até aos seis meses;
- 1 medição de três em três meses, depois dos seis meses (só utilizada em cavidades abandonadas).

Quando se notarem variações nos valores das leituras deve voltar-se a realizar medições diárias para verificar se essas variações se mantém ou estabilizam.

No acaso de cavidades abandonadas devem ser realizadas medições nos primeiros anos com periodicidade trimestral e só deixar de o fazer se não se detectarem alterações e se os trabalhos de desmonte não evoluírem para a proximidade destas.

7.2.4. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Depois de efectuadas as leituras há necessidade de tratar os dados recolhidos. Assim, numa primeira fase, deve-se fazer uma análise crítica da leitura, se possível no local, comparando com os resultados da última leitura, com o objectivo de avaliar o resultado obtido, relativamente a uma possível situação de alarme ou não, e para que se possam eliminar leituras anómalas por comparação com os resultados de aparelhos adjacentes.

Os resultados obtidos deverão posteriormente ser tratados através da sua representação em gráficos contendo as diferenças relativas e acumuladas de cada grandeza em função do tempo. Esses resultados deverão ser guardados em ficheiros informáticos que permitam extrair diferentes tipos de dados agrupados por aparelho, e por data, entre outros, e que possibilitem a elaboração de gráficos de um modo fácil e rápido. O conjunto de dados, que resultam das medições, poderá ser utilizado para definir um modelo, por exemplo através do Método dos Elementos Finitos, e calibrá-lo de modo a poder prever o comportamento do maciço no futuro, através de retroanálise. Este comportamento pode ser facilmente representado através de perfis dos desmontes, que nos informam da distribuição de tensões, dos deslocamentos e dos possíveis pontos de rotura, e que generalizam a informação obtida com a monitorização. Para as grandezas a medir poderão, por ventura, ser estimados valores limites a partir dos quais se entra numa situação de alarme. No entanto, a estimativa destes valores não é fácil, dada a complexidade dos parâmetros geológico-geotécnicos envolvidos, pelo que a interpretação das medições deve basear-se, essencialmente, nos seguintes aspectos:

- Acompanhamento geológico-geotécnico da exploração;
- Estudo do comportamento das curvas deslocamento-tempo (velocidades e acelerações dos deslocamentos);

- Comparação entre os valores obtidos para os vários locais monitorizados;
- Comparação com os resultados dos modelos analíticos e numéricos aplicados à escavação na fase de projecto.

7.3. CONTROLO DA ESTABILIDADE

A abertura de uma cavidade subterrânea num maciço rochoso induz uma alteração do estado de tensão preexistente, podendo resultar na necessidade de instalação de sistemas de suporte que garantam a estabilidade do vazio criado. Nesta fase do estudo, em que se devem definir os elementos de sustimento a utilizar, deverá atender-se ao indicado no Quadro 7.4, no que respeita às actividades a realizar e aos resultados a obter.

Quadro 7.4 - Acções a desenvolver e resultados a obter com o controlo da estabilidade.

ETAPA 3.2 – CONTROLO DA ESTABILIDADE		
ACTIVIDADES	ACÇÕES/MEIOS	RESULTADOS A OBTER
3.2.1. Identificação das Causas de Instabilidade 3.2.2. Métodos de Sustimento 3.2.3. Condições de Aplicação	Estudo das condições de instabilidade presentes nos desmontes Levantamento dos tipos de sustimento artificial existentes no mercado	Definição da metodologia de estabilização do maciço Identificação das situações causadoras de instabilidade Escolha dos tipos de sustimento a utilizar em cada caso Dimensionamento dos métodos de sustimento a empregar e definição dos tempos de aplicação desses mesmos sustimentos

Num projecto de lavra subterrânea de mármores é imprescindível, para dimensionar os desmontes, analisar a capacidade de auto-suporte do maciço. Nos maciços rochosos a capacidade de auto-suporte do terreno é pouco influenciado pelos elementos de sustimento, sendo o seu papel principal controlar as acções de peso do material descomprimido situado entre as periferias da escavação e o "arco de pressão" (Mendes, 1985). As funções desempenhadas pelo sustimento estão interdependentes das características do maciço rochoso, nomeadamente das características de resistência (ângulo de atrito interno e coesão) e do estado de tensão instalado.

Alguns maciços rochosos possuem, em determinados casos, capacidade de originar auto-suporte, não sendo necessário a aplicação de qualquer método externo. Obviamente que tal situação só sucede em determinadas situações e é dependente das características dos maciços rochosos, da dimensão da galeria e do propósito da mesma.

A utilização do sustimento artificial com o objectivo de evitar a fracturação é extremamente difícil, pois este só pode ser colocado após a abertura do vazio e, nesse momento, apesar da resposta do terreno não ser instantânea, podem já ter ocorrido fenómenos de fracturação. No entanto, e apesar do que foi referido, os sustimentos têm um papel importante na fracturação, pois podem evitar a sua propagação para o interior do maciço se forem colocados logo após a abertura das cavidades. Se o estado de tensão for tal que não se consiga evitar a convergência da cavidade e a

fracturação correspondente, devem ser instalados elementos de sustimento capazes de se deformarem e acompanharem as convergências dos contornos da galeria.

Assim, de acordo com o tipo de solicitação e objectivos, diversos tipos de sustimento podem ser utilizados, essencialmente, com os seguintes fins (Gama, 1976, e Mendes, 1985):

- Contrariar deformações elásticas (geralmente só se consegue quando o campo de tensão é de reduzida intensidade);
- Evitar deformações plásticas (fracturação);
- Evitar a queda ou o deslocamento de blocos individualizados;
- Regularizar e impermeabilizar as paredes das escavações;
- Garantir a segurança de pessoas e equipamentos que frequentam a cavidade;
- Assegurar que a cavidade realiza a função para a qual foi escavada.

Para que tais acções possam ser conseguidas, há que escolher e dimensionar correctamente o tipo de sustimento a utilizar e, além disso, atender ao factor tempo no que respeita à aplicação do mesmo, uma vez que a deformação do maciço ocorre em função do tempo.

A acção dos trabalhadores (encarregados e operários) pode ser importante, senão fundamental, na detecção e resolução de problemas relacionados com a estabilidade da exploração subterrânea. A formação destes e o incremento da sua sensibilidade para os problemas que podem ocorrer, bem como para os sinais que o maciço poderá dar, possibilitará uma maior segurança nas explorações, um aumento da produtividade e uma redução de custos na resolução de tais problemas, dado que os mesmos podem ser prevenidos através de uma detecção atempada. O facto dos trabalhadores participarem no estudo do comportamento das cavidades, permitirá a obtenção de mais informação por parte dos engenheiros, no sentido de repensarem determinados aspectos do projecto de engenharia (ex. elementos de suporte a utilizar, etc.).

De acordo com Parker (1973), há que distinguir duas situações de estudo relativamente ao sustimento: as que evoluem demasiado em estudos teóricos para dar uma verdadeira explicação ao problema; e as que não contemplam a ciência e avançam por instinto podendo inviabilizar o recurso mineral existente. Ambos pecam por falta de ponderação e de uma análise adequada da situação. Assim, a melhor abordagem é aquela que alia a teoria à prática, ou seja, que junta o trabalho de escritório e laboratório com a recolha de informação no campo, a uma escala correcta do problema.

7.3.1. IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS DE INSTABILIDADE

O dimensionamento do sustimento adequado para determinada situação de instabilidade, assenta na necessidade de conhece-la e tentar prever a sua ocorrência antes que provoque danos. Ao nível da lavra subterrânea de mármores e atendendo a que a mesma se desenvolve em maciços, em geral, de elevada resistência e de baixa deformabilidade, há a considerar alguns tipos de rotura característicos nestes maciços e que se encontram descritos em pormenor no Anexo VII em termos dos seus parâmetros críticos e dos seus métodos de análise.

No que se refere aos casos de instabilidade presentes na exploração subterrânea de mármores, os principais problemas que aparecem estão relacionados com quedas de blocos, planares (essencialmente nas frentes de desmonte) e em cunha (nas paredes e tecto das cavidades) e com a rotura de pilares naturais (pilares esteios ou pilares barreira, e pilares soleira). Ambas as situações podem resultar em danos graves, embora a rotura de pilares assuma uma importância maior no que concerne à continuação da exploração, pois pode conduzir à ruína das cavidades, enquanto a queda de blocos, normalmente, assume um carácter pontual.

Para evitar estes fenómenos deve conhecer-se o maciço rochoso, bem como as fontes de instabilidade resultantes da presença das cavidades mineiras que, segundo Hoek e Brown (1980), são as descritas no Quadro 7.5.

Quadro 7.5 – Principais causas de instabilidade de cavidades subterrâneas em maciços rochosos.
(adaptado de Hoek e Brown, 1980)

FONTES DE INSTABILIDADE	CAUSA	CONSEQUENCIA	MEDIDAS
Condições geológicas adversas	Falhas, fracturas	Queda de blocos	Orientar convenientemente os desmontes e aplicar sustimentos
Estado de tensão *in situ*	Tensões elevadas	Elevada concentração de tensões nos contornos das cavidade que podem levar à rotura	Adoptar uma forma de secção de desmonte favorável ao estado de tensão e instalar sustimento apropriado
Expansão ou decomposição da rocha por acção de água e/ou ar	Filões, zonas de alteração ou rochas brandas	Alteração e escorregamento	Isolar estes locais da água e do ar (revestimento)
Pressão hidráulica ou percolação da água	Pressões excessivas da água subterrânea	Escorregamentos de zonas alteradas ou de blocos individualizados	Drenagem adequada da água, quer à superfície, quer em profundidade

Para estudar as situações de instabilidade descritas anteriormente, podem ser utilizadas várias técnicas de estudo, das quais se destacam a projecção estereográfica de igual área (permite o estudo de escorregamento de blocos em função da orientação das diaclases e da direcção da frente de desmonte), os métodos probabilísticos (possibilitam o estudo de escorregamento de taludes) e os métodos de análise numérica (permitem estudar o maciço rochoso adjacente, a estabilidade dos pilares naturais, o desempenho de sustimento artificial, etc.).

7.3.2. MÉTODOS DE SUSTIMENTO

O melhor sistema de suporte é, sem dúvida, aquele que utiliza a capacidade de auto-sustimento do maciço rochoso, como já havia sido referido. Para isso o sustimento dos desmontes subterrâneos de mármores assenta no correcto dimensionamento de pilares naturais capazes de garantir esse auto-sustimento. O recurso a elementos de suporte artificiais só deve ser efectuado para determinadas situações específicas, tal como se irá ter oportunidade de observar, devendo ser escolhidos com base num compromisso entre os seguintes aspectos:

- Simplicidade;
- Robustez;
- Eficácia;
- Baixo custo.

Os métodos de sustimento podem ser classificados de acordo com as suas características, do seguinte modo (baseado em Mendes, 1985):

a) Intervalo de tempo em que exercem funções

Sustimentos provisórios – desempenham uma acção durante intervalos de tempo curtos, tais como alguns dias ou meses. A principal função é resistir à acção do peso de blocos de rocha mais ou menos individualizados ou controlar as acções motivadas pelos campos de tensões instalados na vizinhança dos vazios.
Sustimentos definitivos - aplicados para exercerem uma acção em períodos correspondentes à vida útil do vazio. São necessários caso as cavidades venham a ser reutilizadas para outros fins, devendo a estabilidade manter-se com factores de segurança elevados.

b) Continuidade

Sustimentos descontínuos - elementos mais ou menos individualizados uns dos outros, exercendo acções sobre zonas localizadas.
Sustimentos contínuos - elementos interligados de modo a exercerem uma acção conjunta sobre o contorno da cavidade (utilizados em maciços muito fracturados). No caso dos sustimentos definitivos contínuos, estes sistemas englobam também o chamado revestimento, que permite conferir aos contornos do maciço rochosos características de impermeabilidade e, ao mesmo tempo, regularizar a sua superfície.

c) Compressibilidade

Sustimentos compressivos - são sustimentos que se destinam a controlar o comportamento do contorno das cavidades.
Sustimentos indeformáveis - visam garantir as dimensões constantes das cavidades, impedindo que estas se deformem. Resistem a acções de peso mas também ao campo de tensões instalado.

d) Momento da Aplicação

Sustimentos imediatos - são aplicados logo após a criação do vazio.
Sustimentos não imediatos - só são colocados algum tempo depois da criação do vazio.

Os elementos de sustimento a utilizar nas cavidades subterrâneas podem ser provisórios ou definitivos de acordo com o local de aplicação. Assim, nos tectos das cavidades e nos pilares, devem ser colocados elementos definitivos, os quais devem ser dimensionados com esse propósito, dado que são zonas onde se deixa de ter acesso fácil com o evoluir dos desmontes, enquanto nas

paredes ou hasteais se devem utilizar elementos de sustimento provisório, caso ainda se vá desmontar a zona onde estes foram instalados. Quanto à continuidade, os elementos de suporte a utilizar são, na maior parte dos casos, descontínuos, embora possa ser equacionada a instalação de sustimentos contínuos em algumas zonas, tais como cintagens de pilares.

Relativamente à compressibilidade, os elementos que se prevêem instalar são geralmente compreensíveis, embora possa haver necessidade de instalar sistemas de suporte indeformáveis em algumas zonas cuja deformação possa por em causa a estabilidade do maciço, como é o caso dos pilares centrais da escavação.

No que diz respeito ao tempo de aplicação do sustimento, este deve ser aplicado no mais curto intervalo de tempo possível, logo após a abertura do vazio, de modo a actuar com maior eficácia.

Os principais métodos de sustimento que podem ser aplicados em desmontes subterrâneos de mármores são os seguintes:

- Pregagens;
- Ancoragens;
- Cabos;
- Redes metálicas;
- Projecção de betão.

Na indústria extractiva um dos métodos mais utilizado para estabilizar os maciços rochosos são as **pregagens**, cuja utilização tem vindo a ser incrementada ao longo dos últimos anos. Este método de suporte consiste num sistema pontual de sustimento que trabalha por atrito através do contacto contínuo com as paredes do furo. O recurso frequente às pregagens tem a ver com o facto das mesmas apresentarem as seguintes características:

- Versáteis – podem ser utilizadas em qualquer tipo de geometria de escavações;
- Simplicidade na instalação - não apresentam nenhuma complicação;
- Baixo custo – são baratas relativamente ao efeito estabilizante;
- Racionais – podem ser aplicadas através de mecanização total;
- Podem ser combinadas com outros sistemas de suporte, como as redes metálicas e o betão projectado;
- A frequência de aplicação pode ser variável de acordo com o tipo de rocha.

Estes elementos de suporte são utilizados para contrariar a acção de peso de massas de rocha mais ou menos individualizadas. O tensionamento artificial destes elementos não é possível, sendo, no entanto, gerado pelos movimentos do maciço rochoso. Os principais tipos de pregagens, cujas características se apresentam no Anexo VIII, são os seguintes (Hoek, 1998):

- **Pregagens cimentadas** (barra de aço cimentada);
- **Pregagens de atrito ou *Split Set*** (tubo com rasgo longitudinal e diâmetro superior ao do furo que entra à força, promovendo uma acção de atrito);
- **Pregagens do tipo *Swellex*** (tubo em forma de C que abre, por pressão hidráulica, quando colocado no furo, promovendo uma acção de atrito).

Na Figura 7.3 ilustram-se os três tipos de pregagens referidos, sendo observáveis as principais diferenças entres elas.

A. Pregagem cimentada com varão de aço (fonte: Hoek, 1998)

B. Pregagem cimentada com cabo de aço (fonte: Hoek, 1998)

C. Pregagem tipo *Split Set* (fonte: Hoek, 1998)

D. Força de atrito provocada pela pregagem *Split Set* (fonte: Catálogo da Ingersoll Rand)

E. Pregagem tipo *Swellex* (fonte: Hoek, 1998)

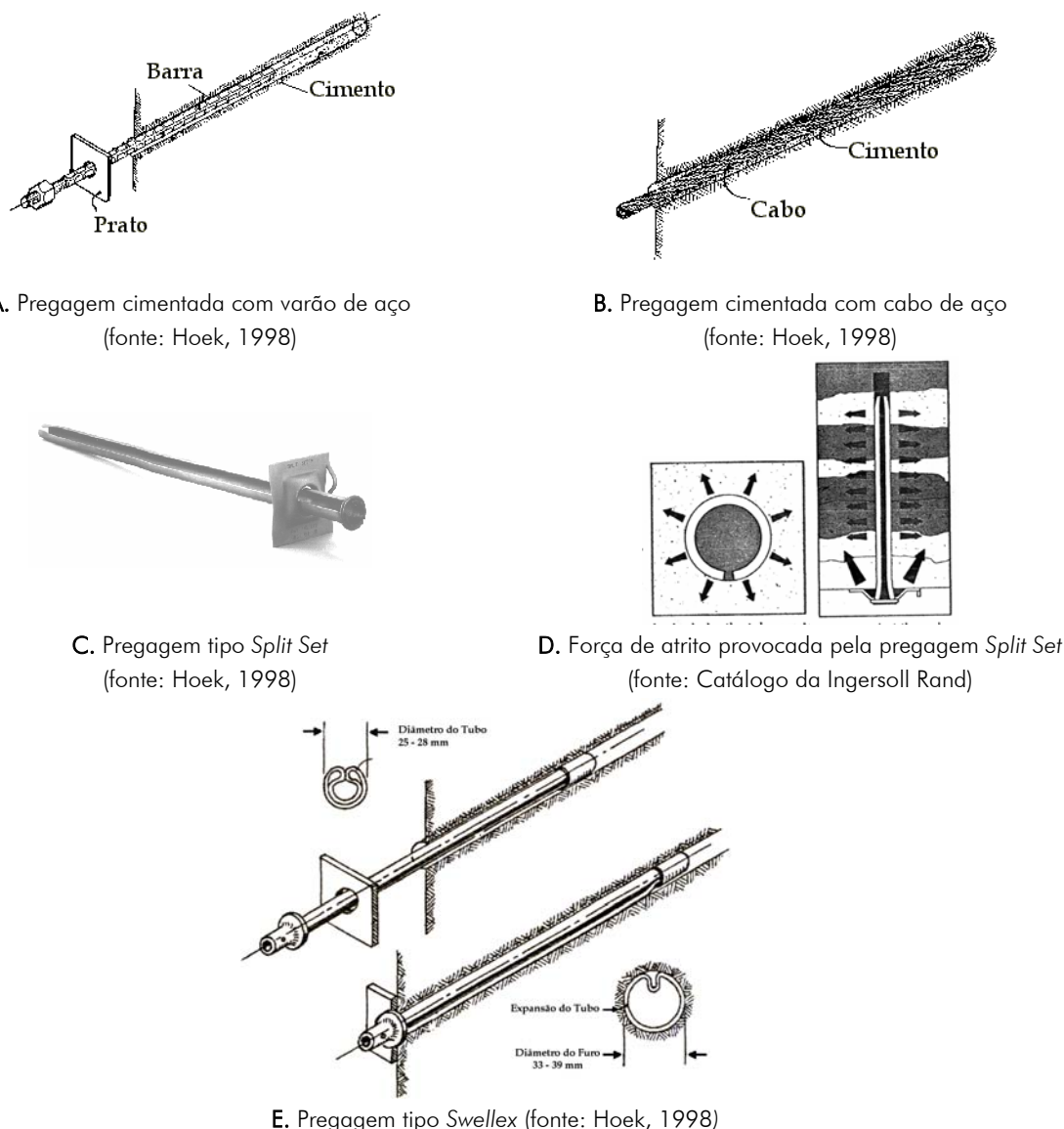



Figura 7.3 – Tipos de pregagens disponíveis no mercado.

As **ancoragens,** ao contrário das pregagens, constituem elementos de suporte activo, devido ao facto de poderem ser tensionadas, exercendo uma acção de suporte independentemente da movimentação dos elementos a suportar. Estas são também conhecidas por métodos de sustimento suspenso e utilizam-se com muita frequência para melhorar o auto-sustimento do maciço e evitar a queda de blocos mais ou menos individualizados (suporte do peso do bloco). Na aplicação de ancoragens numa determinada escavação torna-se necessário estudar um conjunto de parâmetros característicos deste meio de sustimento e que são:

1. Inclinação - depende da orientação do estado de tensão, e/ou da existência de diaclases, ou de outras superfícies de baixa resistência;
2. Comprimento - deverá ser estabelecido de acordo com a inclinação dada e com a espessura da zona fracturada que se pretende suster;

3. Tensão inicial de aperto (ou de montagem) – depende das características de deformabilidade e de resistência do terreno. O valor da tensão inicial deve ser inferior à resistência à tracção da respectiva haste;
4. Tensão máxima admissível – valor de tensão a que a ancoragem ficará sujeita na sua vida útil (deverá ter em conta a resistência da haste);
5. Espaçamento – é determinado, fundamentalmente, de acordo com as características mecânicas dos terrenos, da resistência ao escorregamento das fixações e das tensões iniciais aplicadas;
6. Resistência ao escorregamento da fixação - depende das características do terreno e do sistema de fixação utilizado.

Para se aplicarem as ancoragens são previamente abertos furos na rocha através de martelos perfuradores correntes, geralmente telescópicos, semelhantes aos utilizados para as pregagens, ou com martelos montados em braços de jumbos.

Os principais tipos de ancoragens actualmente disponíveis no mercado são os seguintes (Hoek, 1998):

- Ancoragens Mecânicas (a fixação às paredes do furo é promovida por uma cunha mecânica);
- Ancoragens com Resina (a fixação do elemento de ancoragem às paredes do furo é realizada por meio de resina).

Na Figura 7.4 ilustram-se os dois tipos de ancoragens estudados, de modo a permitir a análise das suas principais diferenças, embora as suas características técnicas possam ser analisadas no Anexo VIII.

A. Ancoragem mecânica (fonte: Hoek, 1998).

B. Ancoragem com resina (fonte: Hoek, 1998).

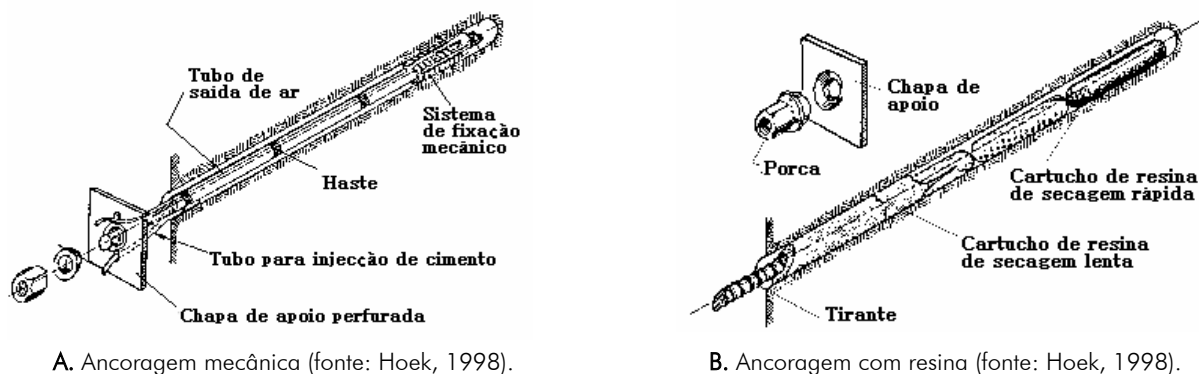



Figura 7.4 – Tipos de ancoragens disponíveis no mercado.

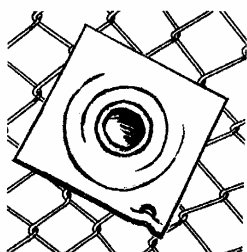
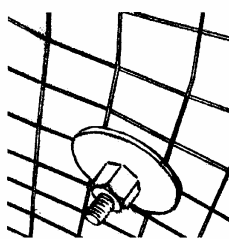
Quando a aplicação das ancoragens é realizada para grandes intervalos de tempo, é costume cimentar o espaço que fica entre a parede do furo e a haste da ancoragem, para prevenir fenómenos de corrosão provocados pela água subterrânea. Para este tipo de protecção também podem ser utilizadas resinas. Nos usos de pouca duração e em terrenos sãos, não há necessidade de cimentar as ancoragens.

O tensionamento de ancoragens pode ser realizado normalmente através de um torgue ou mecanicamente com auxílio de um tensiómetro hidráulico.

Quando a vizinhança do contorno não se apresenta suficientemente firme para a fixação das ancoragens tradicionais, utilizam-se as ancoragens por cabos. Este método de sustimento é geralmente utilizado para grandes comprimentos, da ordem das dezenas de metros. As suas principais características podem ser observadas no Anexo VIII.

As redes metálicas são utilizadas juntamente com ancoragens ou pregagens, cujas cabeças servem como elemento de fixação, tal como se mostra na Figura 7.5-A e 7.5-B. Estes sistemas de suporte são utilizados para evitar a queda de pedras e de blocos individualizados, sendo muitas vezes aplicadas em maciços, ou zonas de maciços, com fracturação muito intensa. Existem dois tipos de malhas metálicas que são utilizadas no sustimento de cavidades subterrâneas:

- Rede metálica corrente – é utilizada para suportar pedras ou blocos individualizados, dependendo a sua capacidade de carga, do espaçamento dos seus pontos de suporte. Não pode ser utilizado com betão projectado porque tem uma malha muito pequena e gera a criação de vazios no interior da camada de betão projectado.

- Rede electrossoldada (pode ser galvanizada para minimizar os efeitos da corrosão) – é, geralmente, utilizada para reforço do betão projectado, devendo este envolver toda a rede para que esta não sofra efeitos de corrosão (ver Figura 7.5-C).

A. Fixação de rede normal

B. Fixação de rede electrossoldada

C. Fotografia da rede electrossoldada

Figura 7.5 – Aplicação de redes metálicas.
(fonte: Hoek, Kaiser e Bawden, 1998)

O betão projectado, por sua vez, é aplicado com a função de cintagem ou de revestimento, tendo nesta segunda aplicação como principais objectivos, regularizar e impermeabilizar os contornos das cavidades criadas. A acção de revestimento pode ser necessária em zonas de afluência indesejada de águas ou em zonas muito alterados, como pode ser o caso de locais junto de filões doleríticos. Após a exploração pode ser necessário revestir algumas zonas do maciço, caso as cavidades subterrâneas sejam reutilizadas para outros fins, atendendo ao tipo de actividade que se venha a desenvolver no seu interior.

Este método de sustimento também pode ser utilizado como sustimento indeformável na cintagem de pilares.

O betão projectado é geralmente aplicado juntamente com a rede metálica, dado que a mesma lhe confere resistência à tracção, servindo como armadura. Apesar disso, em casos em que o betão não sofra esforços de tracção, pode ser aplicado directamente no maciço.

Existem ainda outros tipos de sustimento que podem ser utilizados nos desmontes subterrâneos de mármore, de entre os quais se destaca o entulhamento. Este método consiste no enchimento de cavidades que já foram exploradas e que não possuem qualquer viabilidade (nem para reutilização), por entulhos constituídos por escombros de mármores, capazes de garantir a estabilidade das mesmas. A aplicação desta técnica pode ser útil em casos de probabilidade de aluimentos e/ou para minimizar os impactes causados pelo colocação dos escombros no exterior, formando as escombreiras que se revelam desenquadradas da paisagem. Outros métodos passíveis de aplicar são os esteios artificiais, os quais podem ser de madeira, metálicos, pilhas de pastilhas de betão ou de blocos de mármore devidamente esquadriados e empilhados. Em determinadas zonas com instabilidades localizadas ou em galerias abandonadas, podem ser utilizados com sucesso os elementos de suporte referidos. Nos pilares pode existir necessidade de utilizar técnicas de cintagem com barras metálicas que terão a função de evitar movimentos das fracturas presentes nos mesmos.

7.3.3. CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

A presença de fracturas nas paredes, nos tectos e nos pilares, apresenta-se como a principal causa de instabilidade, originando queda de blocos e redução da resistência dos pilares naturais.

Para fazer face a este problema podem ser aplicadas pregagens, ancoragens ou cabos para aumentar a resistência ao corte das descontinuidades e assim evitar problemas de rotura. Para a realização deste tipo de acções de estabilização e, especialmente, para o reforço dos pilares, é fundamental conhecer a resistência ao corte das descontinuidades presentes no maciço, no sentido de dimensionar convenientemente os elementos de suporte. Na Figura 7.6 apresenta-se uma das situações mais preocupantes em termos de instabilidade, ou seja, o caso de um pilar que é atravessado por uma superfície de descontinuidade que motiva movimento. Nesta situação deve-se intervir atempadamente com vista à sua resolução, pois a mesma pode criar problemas graves de instabilidade no maciço.

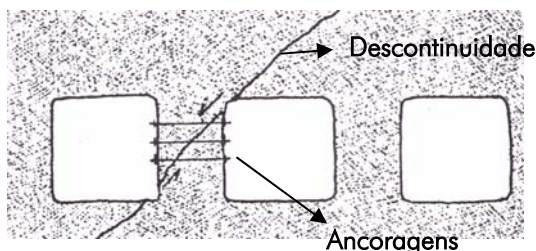



Figura 7.6 - Estabilização de pilares fracturados.
(fonte: Greco, Fornaro e Oggeri, 1999)

Os principais métodos de sustimento a utilizar, em função das condições de instabilidade típicas de explorações subterrâneas de mármores, são os seguintes:

Queda de blocos

- Pregagens
- Ancoragens

Desplacamento de grandes massas

- Ancoragens
- Cabos
- Entulhamento

Escorregamento de terras ou de zonas alteradas

- Rede malhassol
- Drenos
- Pregagens ou ancoragens
- Betão projectado (só utilizado no caso da dimensão das partículas individualizadas ser reduzida)

Rotura de pilares

- Pregagens
- Ancoragens
- Cintagem (cintas metálicas com pregagens, anéis de betão, etc.)

O dimensionamento dos elementos de suporte poderá, numa primeira fase, ser realizado através de métodos empíricos (ex.: classificação de Bieniawski e classificação de Barton), no entanto, o seu desempenho deverá ser complementado por métodos analíticos e, quando possível, através de programas computacionais de análise numérica.

Para dimensionar os sistemas de suporte artificial, a utilizar como complemento dos pilares esteios, sugere-se, no Anexo IX, uma metodologia que poderá ser aplicada para atingir os objectivos pretendidos nesta etapa do projecto da exploração subterrânea de mármores, sendo também apresentadas várias regras e fórmulas úteis de dimensionamento de alguns tipos de suporte estudados.

Dada a especificidade do maciço marmóreo do Anticlinal Estremoz-Borba-Vila Viçosa, atendendo à heterogeneidade geomecânica que apresenta, nomeadamente devido à presença de dobras e fracturação intensa, será de prever a ocorrência pontual de instabilidades, o que motiva o dimensionamento de sistemas de sustimento artificiais, que podem passar pela aplicação de pregagens ou ancoragens, por consolidações ou mesmo por cintagem de pilares.

Numa fase de projecto (Plano de Lavra) deve contabilizar-se os custos deste tipo de equipamentos, bem como dos tempos gastos, e de pessoal necessários para os aplicar.

8. TENDÊNCIAS DA EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES

8.1. PERSPECTIVAS DE EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

A tecnologia utilizada no sector das rochas ornamentais, em especial na extracção de mármores, irá continuar a evoluir no sentido de satisfazer as novas exigências de produtividade, melhorando os seus desempenhos e, ao mesmo tempo, desenvolvendo-se ao nível das condições de segurança e higiene no trabalho, e de respeito pelo ambiente.

As principais tendências desta evolução relacionam-se com a roçadora de galeria que deverá, de um modo gradual, incrementar a utilização da cinta diamantada para promover o corte, em detrimento da roçadora de cadeia, equipada com pastilhas de *Widia*. A primeira apresenta alguns problemas cujos fabricantes terão que resolver, nomeadamente o elevado consumo de água o seu fraco rendimento e curta duração das cintas diamantadas em rochas com dureza superior a três na escala de Mohs, revelando-se, no entanto, um equipamento mais ecológico e mais fácil de operar. A roçadora de cadeia, como necessita de lubrificação, promove a contaminação da água utilizada no corte por contacto com o agente lubrificante, o que pode trazer, em determinados casos, problemas ambientais graves, apesar de apresentar velocidades de corte mais elevadas.

Estão a ser realizados estudos importantes, quer no campo da melhoria do rendimento da cinta diamantada, através da optimização da composição diamantada utilizada, quer no que diz respeito à criação de lubrificantes ecológicos que possam ser aplicados na roçadora de cadeia.

Outro equipamento que também possui um papel importante na exploração subterrânea de mármore, e que irá sofrer importantes desenvolvimentos, é a máquina de fio diamantado, sobretudo em termos das condições de segurança. Uma das alternativas que já se vem aplicando para o fio diamantado tradicional utilizado nos mármores, constituído por molas e espaçadores, é o cabo plastificado que evita a projecção de pérolas e outras peças, no caso da rotura do mesmo. Além disso, os sistemas de paragem automática em caso de rotura do cabo, bem como diversas protecções, estão a ser estudadas para melhorar a segurança deste equipamento.

A adopção de máquinas escavadoras e carregadoras eléctricas, que já existem no mercado, poderá ser uma das tendências futuras a aplicar na lavra subterrânea de mármores, embora a longo prazo, quando as explorações a céu aberto começarem a dar lugar a explorações subterrâneas desenvolvidas e profundas.

A escolha do equipamento para utilizar em subterrâneo deve ser baseada em critérios, não só economicistas, mas também que contemplem as questões ambientais e de segurança, as quais irão assumir um papel importante na selecção natural das empresas competitivas e com capacidade de se implantarem no mercado.

8.2. CRESCENTE INFLUÊNCIA DOS CONSTRANGIMENTOS AMBIENTAIS

Ao longo deste trabalho têm sido afloradas as questões ambientais como factores favoráveis à exploração subterrânea de mármores. É um facto que as cada vez maiores e mais severas exigências ambientais vêm dar uma ajuda importante ao desenvolvimento da lavra subterrânea de mármores no Alentejo, uma vez que os baixos rendimentos das explorações a céu aberto provocam o aparecimento de enormes escombreiras, totalmente desenquadradas na paisagem da planície Alentejana.

A exploração subterrânea, dado o seu carácter selectivo, uma vez que permite deixar pilares em zonas com fraca ou nenhuma qualidade ornamental e explorar as zonas melhores (embora seguindo critérios adequados sem realizar lavra ambiciosa), possibilita reduções consideráveis na produção de estéreis, ao mesmo tempo que deixa livre o terreno à superfície para outros usos (ex.: agricultura), revelando-se um método menos agressivo para a paisagem.

Por outro lado, a lavra subterrânea apresenta ainda outros benefícios ambientais, nomeadamente a redução do nível de ruído emitido para o exterior e a minimização dos impactos causados na paisagem, na flora e na fauna, além de permitir um armazenamento de resíduos nas cavidades subterrâneas criadas.

Os constrangimentos ambientais que vêm penalizar as explorações a céu aberto prometem auxiliar a lavra subterrânea a impor-se no Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa.

8.3. RISCOS INERENTES À ABORDAGEM EMPÍRICA

O empirismo que até agora tem funcionado na lavra a céu aberto não pode, por motivos óbvios que se prendem com a subaproveitamento do recurso, continuar a orientar as decisões ao nível da exploração em subterrâneo. Tal abordagem, em virtude da complexidade geológica do Anticlinal, revelar-se-ia desastrosa, pois a falta de estudo do maciço e um mau dimensionamento dos desmontes pode resultar em acidentes graves motivados pela instabilidade do maciço (desabamentos, aluimentos, etc.). Para além dos prejuízos humanos e materiais que os acidentes podem provocar, contribuiriam certamente para a deterioração do recurso, desacreditando o método de desmonte subterrâneo.

A acontecer uma situação desse género, com maior dificuldade se conseguiriam abrir novas explorações subterrâneas, com todos os prejuízos que daí poderiam advir, quer ao nível do desenvolvimento do sector, quer a nível ambiental.

Dado que as zonas de qualidade ornamental aflorantes já não são fáceis de encontrar, tornam-se necessários maiores investimentos para desmontar camadas superficiais estéreis, contribuindo este facto para o encerramento de algumas empresas. Com o recurso à lavra subterrânea as empresas possuem maior capacidade de subsistência, ao mesmo tempo que incrementam o aproveitamento da jazida.

Ao nível do ambiente, o recurso à exploração subterrânea minimiza os impactes que resultavam da remoção das camadas estéreis superficiais, difíceis de resolver a curto prazo, empolados por todos os outros impactes negativos da lavra a céu aberto em termos da paisagem, da flora, da fauna, dos recursos hidrológicos, etc.

Com base no que foi referido, há necessidade de dotar a indústria dos mármores dos meios que lhe possam garantir o futuro de uma forma mais sustentada. A realização deste trabalho pretendeu ir ao encontro desse objectivo, através da apresentação de uma estratégia de actuação para a abertura de explorações subterrâneas de mármores no Anticlinal, indicando os aspectos intervenientes nesse tipo de abordagem. Como se viu, será necessário recorrer ao conhecimento técnico-científico para elaborar o projecto de engenharia com vista a planear os desmontes e a prever o comportamento do maciço rochoso durante os avanços.

Deve ter-se em atenção que o facto de se dimensionar empiricamente os desmontes poderá motivar uma certa falta de sensibilidade relativamente ao factor de segurança que se está a utilizar e, de certo modo, às propriedades geomecânicas do maciço, podendo levar a que o rebaixo da exploração não seja possível em virtude da diminuição da resistência dos pilares devido ao aumento da sua altura (esbeltez). Assim, um dimensionamento realizado com o objectivo de desmontar muito material no piso de entrada em galeria pode revelar-se inadequado no caso de existir mármore de qualidade nos pisos inferiores. Deste modo, deve-se tentar realizar um dimensionamento racional, baseado em dados científicos, de modo a conseguir um bom aproveitamento do jazigo mineral. Caso se detecte que a dimensão dos pilares é grande relativamente ao vão das câmaras definido com o decorrer dos trabalhos de desmonte, em função das informações geológicas e geomecânicas recolhidas, é sempre possível diminuir a sua secção através da realização de desmontes parciais dos pilares. O contrário é que é perigoso, ou seja, pretender-se avançar com o rebaixo da exploração quando foram deixados pilares com secção insuficiente para suportar as tensões existentes.

O sucesso de uma exploração, para além da qualidade do jazigo, é função do correcto dimensionamento dos desmontes, por parte de técnicos especializados, baseado nos dados científicos que foram apresentados ao longo deste trabalho.

Para que o projecto de engenharia, elaborado cientificamente para uma determinada exploração subterrânea, possa ser cumprido, é importante um acompanhamento permanente do responsável técnico, sendo necessário um diálogo cooperante entre o responsável técnico e os empresários.

Quando um empresário decide avançar com determinada frente sem que o responsável técnico seja consultado, as questões de estabilização do maciço podem não ser acauteladas, o que resultará numa inviabilização de parte do jazigo. Em alguns casos poderá ser impossível para uma empresa atender a todas as exigências dos técnicos, no entanto, quando tal situação suceder, deverá ser discutida com todos as partes interessadas, no sentido de se encontrar a melhor solução que não ponha em risco a exploração.

Na lavra subterrânea existem diversas variáveis que não são empíricas, essencialmente, relacionadas com o comportamento do maciço, daí que a utilização abusiva do método observacional (*as you go*), por parte dos técnicos, baseada unicamente na observação das frentes de desmonte, sem recurso a informações e instrumentos adequados que permitam prever o comportamento mecânico do maciço, podem apresentar consequências drásticas.

Os técnicos devem saber expor aos empresários as necessidades de aquisição de equipamentos (ex.: equipamentos de monitorização), fundamentando essa argumentação do ponto de vista económico, e explicando a sua importância para a continuidade e futuro da exploração. As pressões económicas feitas por parte das empresas, contrariando a compra de determinados equipamentos, só deve ser admitida até certo ponto, devendo-se ser inflexível se deles depender a estabilidade das cavidades e a segurança dos trabalhadores.

8.4. A ENGENHARIA E A GEOMECÂNICA COMO VIAS DE PROGRESSO NO SECTOR

A geomecânica é considerada, universalmente, como uma ciência de base para a exploração subterrânea de recursos minerais (Mendes, 1985). No entanto, apesar dos desenvolvimentos que a mesma tem sofrido, em alguns tipos de indústria extractiva, como é o caso das rochas ornamentais e mais propriamente dos mármores, continua a utilizar-se com muita frequência o empirismo e o instinto, tal como se referiu no capítulo anterior, em detrimento dos conhecimentos geomecânicos disponíveis.

Na exploração subterrânea de mármores a geomecânica é uma disciplina fundamental, não sendo possível o desmonte racional do recurso sem se recorrer a esta ciência. A sua aplicação no projecto de engenharia de uma exploração subterrânea de mármores, tal como foi sugerido na metodologia proposta, deve acontecer logo na fase de prospecção e continuar durante os trabalhos de desmonte com o controlo da estabilidade das cavidades.

A engenharia na indústria dos mármores tem vindo a sofrer um certo incremento, motivado pelo recurso cada vez mais frequente por parte dos empresários do sector, a engenheiros e técnicos com formação superior, para resolução de problemas existentes na lavra (ex.: instabilidade de taludes, cálculo de reservas, etc.). O recurso a este tipo de técnicos irá aumentar impreterivelmente com o desenvolvimento da exploração subterrânea de mármores. É extremamente importante que os estudos de engenharia sejam levados a cabo por técnicos habilitados, sendo para tal aconselhável que as empresas se comecem a mentalizar para a necessidade de possuírem nos seus quadros engenheiros de minas, engenheiros geólogos ou outros, que possam integrar todos os dados disponíveis e criar uma mais valia de informação, que normalmente é perdida.

Hoje em dia, no sector dos mármores, assiste-se à situação de várias empresas que, apesar de terem condições para integrarem engenheiros no seu quadro de pessoal, não o fazerem, alegadamente, por questões económicas, pois consideram que um técnico especializado é caro. Ora isto só é verdade se esse técnico não for capaz de representar para a empresa uma mais valia, o que só não acontece pelas seguintes razões:

- Não lhe é ministrado um bom conhecimento da actividade da empresa, remetendo-o para funções meramente administrativas;
- Não lhe são facultados os meios necessários para obter resultados positivos, ou seja, não são aceites as ideias ou as mesmas não são postas em prática;
- A pessoa escolhida tem manifesta incapacidade de trabalho.

Neste aspecto é importante que os empresários acreditem na capacidade dos engenheiros e dos técnicos, e que sejam exigentes com eles, sendo em muitos casos preferível integrá-los nos seus quadros do que recorrer constantemente a consultores externos. É de notar, no entanto, que apesar da presença de técnicos qualificados nos quadros das empresas, pode ser necessário e fundamental o recurso a serviços externos especializados para a resolução de situações mais complexas.

Outro aspecto importante prende-se com o facto de existir a necessidade de começar a utilizar com maior frequência os programas computacionais de engenharia para o planeamento da lavra e para o auxílio à tomada de decisões.

Para finalizar, e de acordo com Salazar Leite (1957), o empresário do sector dos mármores da década de 50 estava mal esclarecido, isolando-se, não discutindo os problemas da indústria. Hoje em dia, mais de quarenta anos passados, ainda se notam alguns indícios deste tipo de reacção, o que não ajuda ao desenvolvimento do sector e à valorização de um recurso raro e precioso que existe no nosso país. Deste modo, há necessidade de acelerar a mudança de mentalidade no que concerne à importância e benefícios que a aplicação da engenharia e da ciência pode trazer para o desenvolvimento do sector dos mármores, em geral, e da lavra subterrânea no Anticlinal de Estremoz, em particular.

9. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho no qual foi estudada uma metodologia para a abertura de explorações subterrâneas de mármores, tendo como região alvo o Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa, foi possível retirar as seguintes conclusões:

1. A extracção de mármores na região do Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa vem já de longa data, desde o tempo dos Romanos, apesar do seu desenvolvimento só ter começado a assumir maior expressão na segunda metade do séc. XX.

2. Até há cerca de três anos atrás a totalidade das explorações no Anticlinal eram realizadas através do método de desmonte a céu aberto, por degraus direitos, altura em que se iniciou a primeira exploração subterrânea no núcleo de exploração da Vigária.

3. A exploração subterrânea de mármores no Anticlinal apareceu devido à necessidade de maximizar o aproveitamento da jazida em zonas cuja exploração se mostra sem viabilidade económica através do método do céu aberto.

4. A escassez de jazigos aflorantes de fácil exploração no Anticlinal é cada vez maior, o que motiva o alargamento dos desmontes a céu aberto através de galerias subterrâneas capazes de extrair mármore que, doutro modo, não seria possível de explorar dados os grandes investimentos para remover elevadas espessuras de camadas estéreis superficiais (com fraca ou nenhuma aptidão ornamental). O mesmo se passa quando se detectam zonas de mármore com qualidade ornamental por baixo de escombreiras, instalações de apoio ou outros, que na maioria dos casos são, por si só, factores que inviabilizam a sua exploração.

5. A lavra subterrânea afigura-se assim como uma alternativa importante ao método de desmonte tradicional (céu aberto) em algumas zonas do Anticlinal, nas quais as condições geológicas e geotécnicas são propícias a este tipo de desmonte.

6. A curto prazo prevê-se que a lavra subterrânea seja aplicada para maximizar o aproveitamento da jazida marmórea a partir de explorações existentes a céu aberto. A médio-longo prazo poderá ser aplicada à extracção do mármore profundo, nomeadamente a profundidades superiores a 100 m.

7. Dado que o Anticlinal de Estremoz-Borba-Vila Viçosa apresenta características geológicas específicas que impedem a extrapolação directa dos conhecimentos adquiridos noutras regiões, onde a lavra subterrânea de mármores se apresenta mais desenvolvida, como é o caso de Itália e dos E. U. A (estado de Vermont), é de extrema importância a realização de estudos que visem aumentar o conhecimento geológico e geotécnico da jazida marmórea, com vista à sua integração nos projectos de engenharia das explorações subterrâneas.

8. A publicação de dados sobre as explorações subterrâneas actualmente em laboração no Anticlinal e de outras que se venham a iniciar, é fundamental para que o desenvolvimento deste tipo de lavra possa ser uma realidade, contribuindo para a melhoria da competitividade internacional deste sector.

9. O método de desmonte a utilizar na lavra subterrânea de mármores será prioritariamente o de câmaras e pilares, dada a possibilidade de auto-suster o maciço com pilares naturais que minimizam os custos com sustimento e ao mesmo tempo permitem garantir a preservação do jazigo marmóreo ao nível da blocometria disponível para exploração. Poderão aparecer, no entanto, variantes a este método como por exemplo câmaras separadas por pilares barreira.

10. Na exploração do mármore a grandes profundidades é possível que o método das Frentes Corridas também possa ser utilizado, estando a sua aplicação dependente das características geomecânicas da zona a explorar.

11. De acordo com a metodologia proposta neste estudo, para realizar um projecto de engenharia com vista à abertura de uma exploração subterrânea de mármore, a jazida interessada deverá ser analisada em três fases distintas. A primeira, deverá permitir a caracterização geológica (recolha bibliográfica, levantamento de superfície, estudos em profundidade) e geotécnica da jazida marmórea (ensaios laboratoriais e *in situ*), a segunda engloba o dimensionamento dos desmontes, planeamento dos avanços e definição do ciclo produtivo e, a terceira fase, compreende a estabilidade dos desmontes e a sua monitorização.

12. Na caracterização geológica do jazigo marmóreo deve definir-se o seu modelo geoestrutural, o qual deverá ser capaz de identificar as várias litologias presentes, o seu comportamento espacial, estudar o seu grau de fracturação e, acima de tudo, analisar a sua aptidão ornamental, avançando com um zonamento da jazida.

13. A caracterização do maciço sob o ponto de vista geomecânico deverá permitir estimar o estado de tensão preexistente no maciço, ao mesmo tempo que deverá determinar as propriedades geomecânicas das litologias que o constituem e das descontinuidades que o compartimentam, com o objectivo de prever o seu comportamento durante o avanço dos trabalhos subterrâneos.

14. Com os resultados da caracterização geológico-geotécnica da jazida marmórea deverá ser possível a realização de um zonamento ornamental-geotécnico capaz de identificar as zonas com condições para serem exploradas, ao nível da qualidade ornamental, blocometria disponível e do seu comportamento geomecânico. Esse zonamento será tanto mais fiel à realidade quanto maior e mais rigorosa for a informação disponível para a sua definição. Será com base nesse zonamento, que se irão planear os avanços dos desmontes, bem como a sua geometria.

15. O dimensionamento dos desmontes de uma exploração subterrânea de mármores deverá ser realizado recorrendo a vários métodos, podendo ser estudado, numa primeira aproximação, com base nas classificações geomecânicas de Bieniawski e de Barton, devendo esses resultados ser aferidos através da aplicação de métodos analíticos (Método da Área Tributária). Numa fase final do projecto, dada a conservatividade do método da área tributária, deverão ser utilizados modelos numéricos (ex.: Método dos Elementos Finitos, entre outros) capazes de simular o comportamento do maciço durante as várias fases da escavação. Completada esta análise, devem então definir-se os parâmetros geométricos dos desmontes, bem como os seus avanços, os quais devem ser determinados fazendo cumprir os quatro princípios da exploração mineira: Segurança, Economia, Bom Aproveitamento do Jazigo e Respeito pelo Ambiente.

16. O factor de segurança considerado para o dimensionamento dos desmontes deve contemplar a redução da resistência dos pilares naturais durante as fases de rebaixo, salvaguardando situações de fracturação do jazigo mineral (diminuição da blocometria) e de instabilidade dos desmontes, devendo ainda atender à possibilidade de um uso futuro do espaço subterrâneo.

17. A escolha do local de entrada em subterrâneo deverá ser alvo de um estudo pormenorizado, de modo a garantir a continuidade dos trabalhos (qualidade ornamental e estabilidade do maciço) e maximizar as receitas com vista a conseguir um retorno mais ou menos rápido do investimento efectuado (aquisição da roçadora de galeria e de outros equipamentos). Para se poder maximizar o rendimento em termos de blocos comercializáveis e assegurar a estabilidade das cavidades, será importante que a direcção de avanço da exploração tenha em consideração a fracturação e a atitude das camadas marmóreas.

18. A filosofia de avanço dos trabalho subterrâneos deverá, preliminarmente, contemplar a escavação de uma galeria piloto, através da qual se possa recolher mais informação (geológica e geomecânica) de modo a optimizar o projecto de engenharia realizado. Por sua vez o avanço dos desmontes deverá ser definido em função do zonamento ornamental-geotécnico.

19. A prospecção do jazigo deverá ser contínua, mesmo durante os trabalhos de alargamento da exploração a partir da galeria experimental, com recurso a mapeamentos (litologias, descontinuidades, etc.), a ensaios *in situ* (esclerómetro, macacos planos de pequena área, etc.), entre outros.

20. Todo o ciclo produtivo deve ser estudado, desde os equipamentos aos recursos humanos, passando pelas operações principais e auxiliares. Dentro destas últimas devem ser estudadas com algum pormenor, para o caso em análise, as necessidades de ventilação, a iluminação dos trabalhos e a drenagem das águas. As condições de trabalhos nos desmontes subterrâneos devem também ser consideradas, nomeadamente no que diz respeito às medidas e equipamentos de segurança e higiene no trabalho.

21. O equipamento mais importante na exploração na fase de entrada em subterrâneo é a roçadora de galeria. Na fase de rebaixo do piso de entrada utilizam-se as técnicas de desmonte a céu aberto com especial destaque para o recurso à máquina de fio diamantado e à roçadora de bancada (cortes de levante).

22. O controlo da estabilidade dos desmontes deve ser previsto na fase de projecto, quanto a possíveis sistemas de suporte artificiais a aplicar pontualmente (formação de cunhas, intercepção de filões alterados, etc.) e aos instrumentos de monitorização a instalar em fracturas (deslocamentos), pilares (tensões) e contornos das cavidades (deformações), entre outros.

23. O responsável técnico da exploração deverá subscrever o projecto de engenharia (Plano de Lavra) e deverá ser o responsável pelo seu cumprimento, acompanhando de perto os trabalhos, orientando a sua execução com o auxílio do encarregado, realizando os trabalhos de prospecção, de monitorização e de estabilização durante os avanços. Estes trabalhos poderão ter o apoio de outros técnicos habilitados, nos quais este responsável delegue essas funções. O responsável técnico deve estar presente na exploração e deve-lhe caber todas as decisões de actuação ao nível das actividades de estabilização e de monitorização, devendo recorrer a especialistas em casos complexos.

24. Para que o método de exploração subterrânea seja acreditado, é necessário recorrer ao conhecimento científico para a tomada de decisão, com especial destaque para a geologia e para a geomecânica, de modo a que as decisões tomadas neste tipo de lavra sejam fundamentadas. O empirismo que norteou a maior parte das decisões nas explorações a céu aberto, até aos dias de hoje, não pode ser utilizado no caso das explorações subterrâneas, pois a sua aplicação pode trazer danos bastante graves que poderiam por em causa o desenvolvimento da lavra subterrânea de mármores no Anticlinal de Estremoz.

25. Para que o desenvolvimento do sector possa ser uma realidade num futuro próximo, para além da implementação de novas técnicas de desmonte e do avanço das tecnologias, será necessário progredir nos seguintes campos:

- Continuar a estudar em pormenor as reservas do Anticlinal de Estremoz, caracterizando-as do ponto de vista económico. Para isso é fundamental o papel do Instituto geológico e Mineiro (IGM) na elaboração de cartografia geológica temática do Anticlinal, a escalas cada vez maiores.
- Planear adequadamente as áreas de exploração e a lavra nas pedreiras com vista à optimização do aproveitamento do recurso. A este nível será importante o papel da Direcção Regional da Economia.
- Melhorar a legislação em termos de exploração e ordenamento da zona dos mármores. Para isto poderá contribuir o PROZOM (Plano Regional de Ordenamento da Zona dos Mármores).
- Criar condições para a entrada de quadros técnicos qualificados no sector. Para tal deverão as empresas predisporem-se a tal, compreendendo a mais valia de

terem nos seus quadros engenheiros e outros técnicos especializados, sendo ainda de realçar o papel que vem sendo dado pelo CEVALOR, pelas universidades, pelas associações e por empresas de consultoria e projecto especializadas no sector.

- Melhorar as políticas de comercialização. Para isso as associações e o governo deverão tomar as medidas adequadas.
- Aumentar a cooperação entre as empresas e as diversas entidades envolvidas no sector, com o objectivo de se encontrar soluções exequíveis para os problemas ambientais.

BIBLIOGRAFIA

ABRANTES, J. C. (1993) – *"Estudo sobre Tecnologia e Métodos de Desmonte para Mármores na Zona de Vila Viçosa, Borba e Estremoz"*. Março 1993.

ALMEIDA, L. C.; BARROSO, J. A.; BARROSO, E. V. (1997) – *"Altura / Diâmetro de Corpos de Prova X Variabilidade na Resistência de Rochas"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 79, Março de 1997. pp. 71 – 79.

ANDRADE, R. F.; APOLINÁRIO, J. M. M. (1978) - *"A Indústria Portuguesa dos Mármores. Situação Actual e Perspectivas"*. Congresso n.º 78 da Ordem dos Engenheiros, 22 - 29 Novembro, Porto.

ATTEWELL, P. B.; FARMER, I.W. (1979) – *"Principles of Engineering Geology"*. John Wiley & Sons, Inc. London.

BARROS, L. A. (1995) – *"A Pedra: O que foi, o que é, o que será?"*. Comunicações do 1º Congresso Internacional da Pedra Natural. Feira Internacional de Lisboa, 15 – 17 Junho, Lisboa. pp. 9 - 14.

BARTON, N. R.; BANDIS, S. C. (1982) – *"Effects of Block Size on the Shear Behaviour of Jointed Rock"*. 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics. Berkeley. pp 739-760.

BARTON, N. R.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1982) - *"Estimation of Support Requirements for Underground Excavations"*. Underground Mining Methods Handbook. Society of Mining Engineering. Hustrulid, W. A. Editor. pp. 1540 - 1555.

BARTON, N. R. (1988) – *"Previsão do Comportamento de Aberturas Subterrâneas em Maciços Rochosos"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 53, Julho de 1988. pp. 7 – 49.

BARTON, N. R.; BANDIS, S. C. (1990) – *"Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice"*. Proceedings of International Symposium on Rock Joints. Leon. Norway. pp. 603-610.

BARTON, N. R. (1998) – *"NMT Support Concepts for Tunnels in Wear Rocks"*. Tunnels And Metropolises, Negro Jr & Ferreira. Balkema, Rotterdam.

BASTOS, M. (1998) – *"A Geotecnia na Concepção, Projecto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos"*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia. Instituto Superior Técnico. Junho.

BEER, G. (1997) – *"Impact of Computational Methods in Rock Engineering. Part 2"*. Boundary Element and Coupled Methods. International Society for Rock Mechanics. News Journal. Vol. 4, n.º 3. September 1997. pp. 8 – 9.

BENVENUTI, S.; BICCI, A.; BRADLEY, F. (1996) - *"Il Georader Nello Studio della Fratturazione dei Giacimenti do Roccia Ornamentale"*. Marmo Macchine N.º 128 – 2º Bim. pp. 58 - 69.

BERNARDO, P. M. (1995) - *"Dimensionamento e Simulação de Redes de Ventilação Mineira"*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Mineralogia e Planeamento Mineiro. Instituto Superior Técnico. Junho.

BERNARDO, P. M.; GAMA, C. D. (1998) – *"Contribuição para o Estudo de Alternativas de Desmonte Subterrâneo de Mármores – Caso do Anticlinal Borba – Estremoz – Vila Viçosa"*. XII Encontro Nacional do Colégio de Engenharia de Minas. Funchal, 28 de Novembro a 1 de Dezembro de 1998.

BIENIAWSKI, Z. T. (1969) – *"In Situ Large Scale Testing of Coal"*. Proceedings of a Conference by British Geotechnical Society. May 13-14. London.

BIENIAWSKI Z. T. (1976) – *"Rock Mass Classification in Rock Engineering"*. Proceedings of the Symposium on Exploration far Rock Engineering. Vol. 1. Cape Town. South Africa.

BIENIAWSKI Z. T. (1978) – *"Determining Rock Mass Deformability – Experiences from Case* Histories". International Journal of Rock Mechanics. Mining Science & Geomechanics, Abstract 15. pp 237-247.

BIENIAWSKI, Z. T. (1987) - *"Strata Control in Mineral Engineering"*. Student Edition. A. A. Balkema. Rotterdam.

BIENIAWSKI, Z. T. (1992) - *"Design Methodology in Rock Engineering"*. A. A. Balkema. Rotterdam.

BIOLATTI, G.; BOSTICCO, L.; FORNARO, M.; PICCINI, C.; MARINI, G.; PANDOLFI, O.; SANFILIPPO, F. (1994) – *"Sperimentazione per il Transferimento di una Coltivazione a Cielo Aperto in Galleria nel Caso di una Cava Di Pietra Conglomeratica"*. III Congresso Italo Brasiliano Di Ingegneria Mineraria. Verona, 26-27 Settembre, 1994.

BIRÖN, C.; ARIOGLU, E. (1983) - *"Design of Supports in Mines"*. John Wiley & Sons, Inc.

BLOOR, S. (1989) - *"Strain Monitoring in UK Coal Mine Tunnels"*. Geotechnical Instrumentation in Practice, Purpose, Performance and Interpretation. Proceedings of The Conference Geotechnical Instrumentation in Civil Engineering Projects. The Institution of Civil Engineers. Thomas Telford, London. pp. 535 - 550.

BOSTICCO, L.; FORNARO, M.; ORESTE, P. P. (1993) - *"Using Numerical Methods to Rationalize Quarrying in Underground Quarries, with Reference to Carrara Marble"*. Quarry & Construction, n. 6.

BOSU, M.; CICCU, R.; MANCA, P. P. (1995) – *"A rational approach to the design of underground marble quarries"*. IV Congress of Min. Planning. Ed. Balkema. Montreal.

BRADLEY, F.; MUSETTI, C. (1996a) – *"Analysis of the Business Management of a Stone Company - Part I"*. Internationale Marmo Macchine. nº 13. Aprile / Giugno. pp. 78 - 110.

BRADLEY, F.; MUSETTI, C. (1996b) – *"Analysis of the Business Management of a Stone Company - Part II"*. Internationale Marmo Macchine. nº 14. Luglio / Settembre. pp. 26 - 54.

BRADLEY, F. (1997) – *"Guida Alle Cave Di Marmo Di Carrara"*. Internazionale Marmi e Macchine Carrara.

BRADLEY, F. (1999) – *"L'Escavazione del Marmo"*. Manuale tecnico-commerciale. Promorama Srl.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T.(1985) - *"Rock Mechanics for Underground Mining"*. George Allen & Unwin, LTD. London.

BROWN, E. T. (1986) – *"Research and Development for Design and Construction of Large Rock Caverns"*. Proc. of Int. Symposium on Large Rock Caverns. Helsinki, 25-28/8.

CANALI, D. (1997) - *"Archivi del Marmo"*. L' Archivio Fotografico Bessi (1900 - 1960). Aldus Casa di Edizioni in Carrara.

CAPUZZI, Q. (1988) – *"Quarrying marble underground"*. C. Cattaneo Bc. Soc. Studies Center, Carrara.

CAPUZZI Q. (1991) - *"Underground marble extraction: an ecological choice for mountain economies"*. 2nd Conv. "Extraction activity in our mountains", Turin.

CAPUZZI, Q.; JACOPO; EMMANUEL (s/d) - *"L'Escavazione Del Marmo Di Carrara"*. Internazionale Marmi e Macchine Carrara, S.P.A.. Carrara.

CARANASSIOS, A.; TOMI, G.; THEOPHILO, R. A. M. (1992) - *"Aplicação de Métodos Informatizados para Estudo de uma Pedreira de Rocha Ornamental"*. Rochas & Equipamentos, nº 27, 3º trimestre. pp. 124-141.

CARUSO, L. G. (1996) - *"Pedras naturais. Extracção, Beneficiação e Aplicação"*. Rochas & Equipamentos, n.º 43, 3º trimestre. pp. 98 - 156.

CARVALHOSA, A.; GONÇALVES, F.; OLIVEIRA, V. (1987) - *"Notícia Explicativa da Folha 36-D, Redondo, da Carta Geológica de Portugal"*. Serviços Geológicos de Portugal.

CASTRO, J. T. (1994) – *"La Mina de Pizarra: Una alternativa de futuro"*. Roc Maquina – Piedras Naturales, Maquinaria Y Equipos. Septiembre de 1994. pp. 83 – 88.

CASTRO, J. T. (1995) – *"Amostragem de Sondagens de Ardósia"*. Comunicações do 1º Congresso Internacional da Pedra Natural. Feira Internacional de Lisboa, 15 – 17 Junho, Lisboa. pp. 161-165.

CEVALOR (1999) – *"Estudo para a Abertura de uma Exploração Subterrânea de Mármore no Anticlinal de Estremoz – Borba – Vila Viçosa"*. Projecto PORA. Fase 3 – Caracterização Geomecânica do Maciço. Relatórios de Progresso realizados pela Secção de Exploração de Minas do Instituto Superior Técnico. Borba.

COATES, D. F. (1981) - *"Rock Mechanics Principles"*. CANMET. Energy, Mines and Resources Canada.

CONTI, G.; MONTANI, C.; PINZARI, M. (1990) - *"Marble In The World, The stone industry and its trade"*. Società Editrice Apuana. January 1990.

COSTA, C. (1992) – *"As Pedreiras do Anticlinal de Estremoz – A geologia de engenharia na exploração e recuperação ambiental de pedreiras"*. Dissertação Apresentada para Obtenção do Grau de Doutor em Geotecnia, Especialidade de Geologia de Engenharia pela Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa.

COSTA, C.; BARROS, R.; LAMBERTO, V.; LOPES, L.; VINTÉM, C. (1998) – *"Mármores de Estremoz: Geologia, Prospecção, Exploração, Valorização e Ordenamento da Jazida"*. V Congresso Nacional de Geologia. Livro Guia das Excursões. Instituto Geológico e Mineiro. Novembro. Lisboa. pp. 191 – 200.

CORTEZ, A. SIMÕES (1962) - *"O Uso de Explosivos no Desmonte da Lousa"*. Revista "Engenharia", nº 31. Associação da Faculdade de Engenharia do Porto. Porto. pp. 44 - 48.

CRESPO, A. (1991) - *"Novas Tecnologias Para Extracção de Rochas Ornamentais"*. Rochas & Equipamentos, nº 24, 4º trimestre. pp. 122 - 136.

CUNHA, A. P.; FERNANDES, J. G. (1980) - *"Observação de Obras Subterrâneas"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 28, Março, pp. 63 – 90.

DAVIS, G. H.; REYNOLDS, S. J. (1996) – *"Structural Geology of Rocks and Regions"*. John Wiley & Sons, INC.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. (1989) – *"Ground - Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy"*. Geophisical Prospecting, nº 37. pp. 531 - 551.

DEERE, D.; MILLER, R. P. (1966) – *"Engineering Classification of in situ Rock"*. Technical Report AFWL – TR64-144. Air Force Weapons Laboratory, Kirtland AFB. New Mexico.

DEERE, D.; PECK, R. B.; MONSEES, J. E.; PARKER, H.W.; SCHMIDT, B. (1970) – *"Design of Tunnel Support Systems"*. Proceedings 49th Annual Highway Research Board, Washington, D.C.

DEL SOLDATO, M.; PINTUS, S. (1985) – *"Historical Geological Study of Extraction Activities and Techniques in Eastern Liguria"*. Lunigianese Academy of Science, vols. XLV-XLVII, La Spezia.

DIXON, J. D.; MAHTAB, M. A.; GRASSO, P. (1993) - *"Potential of Spiral Mining for Excavating Storage Caverns in Salt"*. Seventh Symposium on Salt, Vol I. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam. pp. 305 - 312.

FERREIRA, M. J. (1976) – *"Métodos Modernos de Dimensionamento de Túneis – Equacionamento Geral Modelos Experimentais"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 16, Fevereiro – Março. pp.3-47.

FORNARO, M.; BOSTICCO, L. (1994a) – *"Underground Stone Quarrying In Italy. Its Origins, The Present Day and Prospect (Part 1)"*. Ed. Promorama SRL. Marmo Macchine International. n.º 6, Luglio/Settembre. pp. 28 - 54.

FORNARO, M.; BOSTICCO, L. (1994b) – *"Underground Stone Quarrying In Italy. Its Origins, The Present Day and Prospect (Part 2)"*. Editrice Promorama SRL. Marmo Macchine International. N.º 7, Ottobre/Dicembre. pp. 22 - 51.

FORNARO, M.; BOSTICCO, L. (1995a) – *"Underground Stone Quarrying In Italy. Its Origins, The Present Day and Prospect (Part 3)"*. Editrice Promorama SRL. Marmo Macchine International. N.º 8. Jennaio/Marzo. pp. 32 - 56.

FORNARO, M.; BOSTICCO, L. (1995b) – *"Underground Stone Quarrying In Italy. Its Origins, The Present Day and Prospect (Part 4)"*. Editrice Promorama SRL. Marmo Macchine International. N.º 9, Aprile/Giugno. pp. 64 - 87.

FORNARO M.; BOSTICCO L.; BIOLATTI, (1995) – *"The Environmental Advantages and Operating Results of Underground Quarrying of an Ornamental Stone"*. Comunicações do 1º Congresso Internacional da Pedra Natural. Feira Internacional de Lisboa, 15 – 17 Junho de 1995, Lisboa. pp. 105-112.

FORNARO, M.; BOSTICCO, L. (1998) – *"Le Cave Sotterranee di Pietra in Italia"*. Bulletim GEAM (Geoingegneria Ambientale e Mineraria), Marzo, nº 1. pp. 21 - 26.

FORNARO M.; FERRARESE, P.; FIORA, L.; PRIMAVORI, P. (1999) – *"La Coltivazione dei Marmi Verdi Della Valle D'Aosta. Aspetti giacimentologici, tecnici ed economici"*. Marmo Macchine, nº 146, 2º Bim. pp. 168 – 230.

GALVIN, J. M.; HEBBLEWHITE, B. K.; SALAMON, M. D. G. (1996) – *"Australian Coal Pillar Performance"*. International Society for Rock Mechanics. News Journal. Vol. 4, n.º 1. Fall 1996. pp. 33 – 38.

GAMA, C. D. (1976) - *"Cálculo Expedito da Estabilidade de Túneis e de suas Necessidades de Suporte"*. VI Simpósio Brasileiro de Mineração. Agosto de 1976.

GAMA, C. D. (1989) - *"Analysis of Marble Fractures Induced by Stress Concentrations at Quarries"*. Estratto da Atti del Congresso Internazionale di Geoingegneria. Torino, 27-30 Settembre 1989. pp. 805-810.

GAMA, C. D.; BASTOS, M. (1994) - *"Análisis Volumétrico de Macizos Rocosos Fracturados para Optimizar la Extracción de Rocas y Minerales"*. Revista INGEOPRES, nº 6, Fevereiro.

GAMA, C. D. (1995) - *"Aspectos Geotécnicos no Desenho de Pedreiras Subterrâneas"*. Revista Rochas e Equipamentos. N.º 38, 2º trimestre. pp. 108 - 128.

GAMA, C. D. (1996) - *"Correlation Between Rock Mass Classes, Convergence Rates and Support Densities for Underground Coal Mine Excavations"* in Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. Proceedings of the ISRM International Symposium. Eurock'96. Torino, Italy, 2 - 5 September 1996. A. A. Balkema. Rotterdam, Brookfield. pp. 825 - 830.

GAMA, C. D. (1997) - *"Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos"*. 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Lisboa 9 e 10 de Dezembro.

GAUTIER, J. M.; GRUNEISEN, P.; MASSA, D.; RUHLAND, M. (1973) - *"Fracturation et Analyse Tectonique sur Carottes de Sondage. Ètude Mèthodologique Appliquèe au Champ D'Hassi - Messaoud Nord"*. Bulletin Sci. Géol. n.º 26, 2-3. Strasbourg. pp. 115-159.

GEOCONSULT (1995) – *"Manual de Túneles"*. Ed. Geoconsult – Ingenieros Consultores, S.A.. Madrid.

GONÇALVES, F. (1974) - *"Notícia Explicatíva da Folha 36-B, Estremoz, da Carta Geológica de Portugal"*. Serviços Geológicos de Portugal.

GOMES, A. PARREIRÃO (1999) – *"Exploração Subterrânea de Mármores – Avaliação estratégica"* I Congresso Internacional do Mármore do Alentejo para o Século XXI. 7 e 8 de Outubro de 1999. Vila Viçosa.

GOURRY, J. C.; GRANDJEAN, G.; ABRAHAM, O. (1996) - *"Geophysical Imagery of Small - Scale Fractures"*. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, nº 1, pp. 187 - 199.

GRANDJEAN, G.; GOURRY, J. C. (1996) - *"GPR Data Processing for 3D Fracture Mapping in a Marble Quarry (Thassos, Greece)"*. Journal of Applied Geophysics, nº 36. Elsevier Science B. V.; Amsterdam. pp. 19 - 30.

GRASSO, P.; MAHTAB, A.; FERRERO, A. M.; PELIZZA, S. (1991) - *"The Role of Cable Bolting in Ground Reinforcement"*. ATTI Proceedings of Soil and Rock Improvement In Underground Works. Milano 18 - 20 Marzo. Societá Italiana Gallerie. Vol. I.

GRECO, O.; FORNARO, M.; OGGERI, C. (1999) – *"Underground Dimension Stone Quarrying: rock mass structure and stability"*. 99 International Symposium on Mining Science and Technology. 29 – 31 August 1999, Beijing.

GROSSMAN, N. F. (1983) – *"Amostragem e Método ISM"* in Desenvolvimentos Recentes no Domínio da Mecânica das Rochas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1983. pp. 73 - 89.

GROSSMAN, N. F. (1983) – *"Descontinuidade"* in Desenvolvimentos Recentes no Domínio da Mecânica das Rochas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1983. pp. 163 - 197.

GROSSMAN, N. F. (1987) – *"As Descontinuidades nos Maciços Rochosos. Caracteristicas Geométricas e Influência da Deformabilidade dos Maciços"*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I & D Programa de Investigação. Lisboa.

GROSSMAN, N. F. (1999) – *"A Determinação In Situ da Deformabilidade dum Maciço Rochoso"*. Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros. 2º Série. N.º 34, Fevereiro 1999. pp. 78-82.

GUERREIRO, H.; LEITÃO, A.; PEREIRA, S. (1998) - *"Sector das Pedras Naturais: Manual de Prevenção"*. IDICT, Série Informação Técnica nº 8. Lisboa.

HARTMAN, H. L. (1987) - *"Introductory Mining Engineering"*. University of Alabama. Ed. John Wiley & Sons, Inc.. Alabama.

HARTMAN, H. L. (1992a) - *"SME Mining Engineering Handbook"*. Society for Mining , Metallurgy, and Exploration, Inc. 2nd Edition. Volume1. Littleton, Colorado.

HARTMAN, H. L. (1992b) - *"SME Mining Engineering Handbook"*. Society for Mining , Metallurgy, and Exploration, Inc. 2nd Edition. Volume2. Littleton, Colorado.

HOEK, E. (1991) – *"When is a Design in Rock Engineering Acceptable?"*. Proceedings of the 7º International Congress on Rock Mechanics. International Society For Rock Mechanics. Volume 3. A. A. Balkema. pp. 1485 - 1497.

HOEK, E. (1998) – *"Rock Engineering"*. Course Notes.

HOEK, E.; BRAY, J. W. (1977) – *"Rock Slope Engineering"*. Revised second edition. The Institution of Mining and Metallurgy. London.

HOEK, E.; BROWN, E. T. (1980) – *"Underground Excavation in Rock"*. The Institution of Mining and Metallurgy. London.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. (1998) – *"Support of Underground Excavations in Hard Rock"*. A. A. Balkema. Rotterdam. Brookfield.

HUDSON, J. A. (1993) - *"Comprehensive Rock Engineering - Principles, Practice & Projects"*. Volume 4, Excavation, Support and Monitoring. Pergamon Press Ltd.

HUGGENBERGER, P.; MEIER, E.; PUGIN, A. (1994) - *"Ground - Probing Radar as a Tool for Heterogeneity Estimation in Ravel Deposits: Advances in a data processing and facies analysis"*. Journal of Applied Geophysics, nº 31. Elsevier Science B. V., Amsterdam. pp. 171 - 184.

ISRM (1972) – *"Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials and the Point Load Strength Index"*. Comission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Committee on Laboratoty Tests. Document No. 1, Part 2.

ISRM (1978) – *"Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses"*. International Journal of Rock Mechanics. Mining Science & Geomechanics. Vol. 16. pp. 135-140.

JAEGER, J. C.(1960) – *"Shear Failure of Anisotropic Rock". Geology Magazine. Volume 97. pp 65-72.*

JIMENO, C. L. (1995) – *"La Explotación de Canteras Subterráneas. Realidad o Ficción?"*. Jornada Técnica sobre Canteras Subterráneas. Barcelona. Janeiro de 1995.

JIMENO, C. L. (1996) – *"Manual de Rocas Ornamentales – Prospección, Explotación, Elaboración y Colocación"*. Entorno Grafico, S. L. 2ª Edición. Madrid.

KARMIS, P.; GOURRY, J. C.; PICCOLO, M.; GAZZANO, J.; BOI, M.; GALANAKIS, D.; MASTROYIANNIS, D. (1995) – *"A New Approach to the Exploration and Exploitation of Ornamental Stones Via Modern Geophysical Techniques"*. Comunicações do 1º Congresso Internacional da Pedra Natural. Feira Internacional de Lisboa, 15 – 17 Junho, Lisboa. pp. 237-246.

LADEIRA, F. L. (1978) - *"Mármores"*. Separata do Vol. 14, nº 4 do Boletim de Minas. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa.

LADEIRA, F. L. (1981) - *"Relação das Fracturas dos Mármores Alentejanos com outras Estruturas"*. Boletim da Sociedade Geológica de Portugal. Vol. XXII. 1980 –1981. Lisboa.

LAMBERTO, V. (1997) - *"Contribuição da Estatística Espacial Multivariada para o Zonamento das Rochas Ornamentais de Estremoz"*. Dissertação apresentada à U.N.L. – Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de mestre. Lisboa.

LEITE, A. S. (1957) - *"Indústria de Mármores e Cantarias"*. Relatório 0.2 do II Congresso da Indústria Portuguesa.

LNEC (1994) - *"Escavação de Maciços Rochosos"*. ICT. Curso de Promoção Profissional. Geotecnia. Lisboa.

LNEC (1994) - *"Escavação de Maciços Rochosos, Anexos"*. ICT. Curso de Promoção Profissional. Geotecnia. Lisboa.

LOPES, J. L. (1995) – *"Caracterização Geológico – Estrutural do Flanco Sudoeste do Anticlinal de Estremoz e Suas Implicações Económicas"*. Dissertação apresentada ao D.G.F.C.U.L. para obtenção do grau de mestre em Geologia Dinâmica Interna. D.G.F.C.U.L.. Junho.

MAHTAB, M. A.; BOLSTAD, D. D.; ALLDREDGE, J. R.; SHANLEY, R. J. (1972) - *"Analysis of Fracture Orientations for Input Structural Models of Discontinuous Rock"*. Bureau of Mines Report of Investigations. United States Departement of The Interior.

MAHTAB, M. A.; LAMB, D. W.; SAMBEEK, L. L. V.; GILL, J. D. (1979) - *"National Strategic Crude Oil Storage in The Weeks Island Dome Salt Mine. Part I - Geotechnical Evaluation"*. Journal of Energy Resources Technology. Vol. 101, June 1979. pp. 82 - 86.

MAHTAB, M. A.; HANSEN, F. D.; SAMBEEK, L. L. V.; GNIRK, P. F. (1979) - *"National Strategic Crude Oil Storage in The Weeks Island Dome Salt Mine. Part II - Rock Mechanics Evaluation"*. Journal of Energy Resources Technology. Vol. 101, June 1979. pp. 87 -92.

MAHTAB, M. A.; XU, S.; GRASSO, P. (1994) - *"Quantification of The Effective Coulomb and the Hoek - Brown Parameters of the Pre-Reinforced Rock Mass"* in Geomechanics 93 (Strata Mechanics / Numerical Methods / Water Jet Cutting / Mechanical Rock Disintegration). Proceedings of the International Conference Geomechanics 93. Hradec, Ostrava, Czech Republic, 28 - 30 September. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. pp. 31 - 37.

MAHTAB, M. A.; YEGULALP, T. M. (1984) - *"A Similarity Test for Grouping Orientation Data in Rock Mechanics. Rock Mechanics in Productivity and Protection"*. Proceedings Twenty - Fifth Symposium on Rock Mechanics. Nortwestern University Evanston, Ilinois, June 25- 27. Society of Mining Engineers of The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York, pp. 495 - 502.

MARTINS, O. R. (1973) – *"Missão de Estudo de Mármores e Granitos nos Estados Unidos da América e no Canadá"*. Direcção Geral de Geologia e Minas. Boletim de Minas, Vol. 10, n.º 3. Julho / Setembro 1973. pp. 135-169.

MARTINS, O. R. (1987) – *"Prospecção e Exploração de Granitos Ornamentais"*. Revista "A Pedra". nº 24, Ano VI, Abril /Junho. pp. 19 - 33.

MARTINS, O. R. (1990) – *"Panorâmica Nacional da Indústria Extractiva das Rochas Ornamentais em 1989"*. Revista "A Pedra" nº 38, pp 17-37.

MARTINS, O. R. (1994) – *"Rochas Ornamentais. Produção Nacional e Comércio Externo de Portugal em 1993"*. Separata do Vol. 31, nº 3 do "Boletim de Minas". Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.

MARTINS, O. R. (1995) – *"Rochas Ornamentais. Produção Nacional e Comércio Externo de Portugal em 1994"*. Separata do Vol. 32, nº 3 do "Boletim de Minas". Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.

MARTINS, O. R. (1996a) – *"Rochas Ornamentais. Produção Nacional e Comércio Externo de Portugal em 1995"*. Separata do Vol. 33, nº 3 do "Boletim de Minas". Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.

MARTINS, O. R. (1996b) – *"Exploração Subterrânea de Mármores"*. Separata do Vol. 33, n.º 1 do Boletim de Minas. Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.

MARTINS, O. R. (1997) – *"Rochas Ornamentais. Produção Nacional e Comércio Externo de Portugal em 1996"*. Separata do Vol. 34, nº 3 do "Boletim de Minas". Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.

McCANN, D. (1992) - *"Rock Mass Assessment Using Geophysical Methods"*. Engineering in Rock Masses. F. G. Bell. Butterworth - Heinemann, Oxford.

MELLETT, J. S. (1995) - *"Ground Penetrating Radar Applications in Engineering, Environmental Managemenet, and Geology"*. Journal of Applied Geophysics, nº 33. Elsevier Science B. V., Amsterdam. pp. 157 - 166.

MENDES, F. MELLO (1968) - *"Mecânica das Rochas"*. Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico. Lisboa.

MENDES, F. MELLO (1974) – *"Condicionalismos e Problemas da Indústria de Construção e Rochas Ornamentais"*. Memória MI-18. Universidade de Luanda.

MENDES, F. MELLO (1983) – *"Objectivos do Projecto de Túneis em Rocha"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 38, Julho de 1983. pp. 45 - 56.

MENDES, F. MELLO (1985) – *"Geomecânica Aplicada à Exploração Mineira Subterrânea"*. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Hidromineira – Consultores de Minas e Geomecânica, Lda. Lisboa.

MENDES, F. MELLO (1995) – *"A Segurança Estrutural em Engenharia de Minas"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 74, Julho de 1995. pp. 1 - 13.

MOURA, A. C.; FERREIRA, N. (1995) – *"Aspectos Metodológicos do Estudo e Caracterização de Maciços Graníticos tendo em Vista a sua Exploração para a Produção de Rochas Ornamentais e Industriais"*. Comunicações do 1º Congresso Internacional da Pedra Natural. Feira Internacional de Lisboa, 15 – 17 Junho, Lisboa. pp. 255-262.

MIRANDA, A. M.; FIGUEIREDO, P. R.; SILVA, L. F. (1989) - *"Tecnologia de Sondagens"*. Curso FSE / ADIST.

MIRANDA, A. M. (1991) - *"A fracturação dos Maciços de Rochas Ornamentais e a sua Importância Técnico - Económica"*. Revista Rochas & Equipamentos, nº 24. pp. 64 - 79.

MIRANDA, A. M. (1995) – *"Caracterização Geológica e Geotécnica de Pedras Naturais"*. Comunicações do 1º Congresso Internacional da Pedra Natural. Feira Internacional de Lisboa, 15 – 17 Junho, Lisboa. pp. 61-62.

MUGE, F.; COSTA, L. (1984) - *"Planeamento de um Desmonte a Céu Aberto Utilizando Algoritmos de Cálculo Automático"*. Boletim de Minas n.º 21, 2º, Abril/Junho. Lisboa. pp. 79 - 87.

NUNES, J. M. (1975) – *"Elementos para uma História da Construção de Galerias"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 15, Dezembro de 1975. pp. 79 – 134.

OBERT, L.; DUVALL, W. I.; MERRILL, R. H. (1960) - *"Design of Underground Openings in Competent Rock"*. Bulletin 587. Bureau of Mines. United States Government Printing Office.

OBERT, L.; DUVALL, W. I. (1967) - *"Rock Mechanics and Design of Structures in Rock"*. John Wiley & Sons. New York.

OLIVEIRA, J. T.; OLIVEIRA, V. M.; PIÇARRA, J. M. (1991) – *"Traços Gerais da Evolução Tectono-Estratigráfica da Zona de Ossa – Morena, em Portugal"*. Cuadernos Lab. Xeológico de Laxe Coruña. Vol. Nº 16. pp. 221-250.

OLIVEIRA, R. (1975) – *"Túneis. Prospecção Geológica e Geotécnica"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 15, Dezembro. pp. 137 – 151.

OLIVEIRA, R. (1977) – *"Cartografia Geológica de Túneis"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 20, Junho - Julho. pp. 111 - 119.

OLIVEIRA, R. (1986a) – *"Estudos Geológicos e Geotécnicos para o Projecto de Túneis"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 46, Março. pp. 9 – 20.

OLIVEIRA, R. (1986b) – *"Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas. Conceitos Fundamentais. Metodologia de Estudo de Maciços Rochosos"*. II Simpósio Sul Americano de Mecânica das Rochas. Porto Alegre, Brasil. Outubro de 1986. pp. 203 - 214.

ORDEM DOS ENGENHEIROS (1984) - *"Engenharia do Mármore"*. Registo do Ciclo de Palestras / Painéis. Lisboa 16 a 18 de Abril 1980, Comissão Cultural de Engenharia de Minas. Lisboa.

PAGE, C. H.; HAINES, A.; ESTERHUIZEN, G. S. (1983) – *"Geotechnical Investigation – Design Criteria for a Room and Pillar Flourspar Mine"*. Proceedings 5th Congress of International Society for Rock Mechanics. Section D. Melbourne. pp. 61 – 65.

PALMSTRÖM, A. (1982) – *"The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Jointing"*. Proceedings 4th Congress International Engineering Geology, Delhi 5. pp. 221 – 228.

PALMSTRÖM, A. (1997) – *"Collection and Use of Geological Data in Rock Engineering"*. International Society for Rock Mechanics. News Journal. Vol. 4, n.º 2. Spring 1997. pp. 21 – 25.

PANDOLFI, D. & O. (1995) – *"La Cava"*. Belforte Grafica. Livorno.

PANDOLFI, D. & O. (1997) – *"La Cava. (vol.2)"*. Graphin s.r.l., Sarzana.

PARKER, J. (1973) - *"Practical Rock Mechanics For Miners"*. E./MJ Publication.

PATTON, F. D. (1966) – *"Multiple modes of Shear Failure in Rock"*. Proceedings of 1st Congress of International Society for Rock Mechanics. Lisbon. pp 509-513.

PELIZZA, S.; GAMA, C. D.; MAHTAB, A.; PEILA, D. (1994) - *"Reuse of Abandoned Underground Mine"*. ITU 40 th Anniversary Symposium. Instambul, 1-3 December, 1993.

PETERSON, T. R. (1978) - *"Tunnels and Shafts in Rock"*. Engineering and Design. Engineer Manual nº 1110-2-2901. Department of the Army, Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers. 15 September.

PINTO, J. L. (1990) – *"Estado de Tensão dos Maciços Rochosos"*. Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros. Novembro 1990. pp. 12 – 30.

PINTO, P. S. S. (1987) – *"Observação de Barragens de Aterro"*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Seminário 281, Especialização e Aperfeiçoamento. Geotecnia. Lisboa 1987.

PRIMAVORI, P. (1996) - *"Portugallo: L'evoluzione Continua"*. Marmo Macchine N.º 128 – 2º Bim. 1996. pp. 88 - 108.

PRIMAVORI, P. (1997) - *"Il Materiali Lapidei Ornamentali: Marmi, Graniti e Pietre"*. Edizioni ETS.

REYNAUD, R.; VINTÉM, C. (1992) - *"Estudo da Jazida de Calcários Cristalinos de Estremoz-Borba-Vila Viçosa – Sector de Pardais"*. Instituto Geológico e Mineiro. Separata do Volume Nº 31 do "Boletim de Minas". Lisboa. pp. 355-473.

REYNAUD, R.; VINTÉM, C. (1994) – *"Estudo da Jazida de Calcários Cristalinos de Estremoz-Borba-Vila Viçosa – Sectores Lagoa-Vigária e Borba"*. Estudos Notas e Trabalhos, Tomo 34. Ed. Laboratório e Serviço de Fomento Mineiro. Porto. pp. 3-84.

ROCHA, M. (1981) – *"Mecânica das Rochas"*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Estudos. Lisboa.

RODRIGUES, F. P. (1986) - *"Ensaios In Situ em Maciços Rochosos para Fundações de Barragens"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 46, Março de 1986. pp. 35 – 58.

SALAMON, M. D. G.; ORAVECZ, K. I. (1976) - *"Rock Mechanics In Coal Mining"*. Coal Mining Research Controlling Council. The Chamber of Mines of South Africa.

SALAMON, M. D. G. (1983) - *"The Role of Pillars in Mining. Rock Mechanics in Mining Practice"*. Ed. Budavari. The South African Institute of Mining and Metallurgy. Joannesburgh.

SCHOLEY, J.; INGLE, D. G. (1989) - *"Monitoring Tunnel Support by Convergence Measurement"*. Geotechnical Instrumentation in Practice, Purpose, Performance and Interpretation. Proceedings of The Conference Geotechnical Instrumentation in Civil Engineering Projects. The Institution of Civil Engineers. Thomas Telford, London. pp. 495 - 506.

SERAFIM, J. L.; PEREIRA, J. P. (1983) – *"Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski"*. Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Underground Contruction. Volume 1 (II). Lisbon. pp. 33-44.

SHEOREY, P. R. (1993) - *"Design of Coal Pillar Arrays and Chain Pillars. Comprehensive Rock Engineering"*. Principles, Practice and Projects. Volume 2. Pergamon.

SILVA, C. G. (1989) – *"Mármores da Região de Estremoz – Borba – Vila Viçosa, Caracterização Minero Petrográfica, Geoquímica e Geomecânica. Contribuição para o Conhecimento da sua Alterabilidade, Fracturação, e Blocometria"*. Dissertação apresentada à U. T. L. – Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de doutor em Engenharia de Minas. Lisboa.

SILVA, M. C. (1995) – *"Entulhamento com Rejeitados para Melhoria do Comportamento de Pilares Esteios"*. Dissertação apresentada à U. T. L. – Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de doutor em Engenharia de Minas. Lisboa.

SILVÉRIO, A. (1975) - *"Ensaios In Situ no Domínio dos Túneis em Maciços Rochosos"*. Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. N.º 15, Dezembro de 1975. pp. 43 – 76.

SINHA, R. S. (1989) – *"Underground Structures"*. Design and Instrumentation. Developments in Geotechnical Engineering, 59 A. Elsevier.

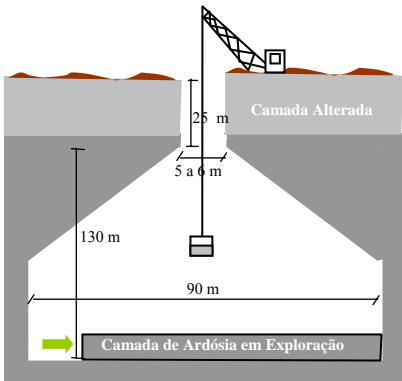
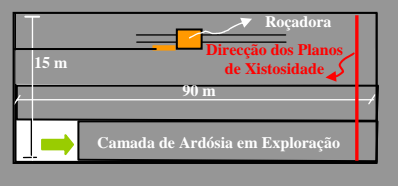
SOFIANOS, A. I.; KAPENIS, A. P.; ROGAKIS, C. (1998) – *"Voussoir Beam Analysis of an Underground Marble Quarry"*. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith. Ed. Balkema, Rotherdam. pp. 515 – 520.

STACEY, T. R.; PAGE, C. H. (1986) – *"Practical Handbook for Underground Rock Mechanics"*. Series on Rock and Soils Mechanics. Vol. 12 (1986). Ed. Trans Tech Publications.

TAMAMES, T. CELADA (1997) – *"Diseño del Sotenimiento de Túneles"*. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Ed. López Jimeno. Entorno Gráfico, S. L. Madrid. pp. 448-474.

VALLIAPPAN, S. (1997) – *"Impact of Computational Methods in Rock Engineering. Part 1. Finite Element Method"*. International Society for Rock Mechanics. News Journal. Vol. 4, n.º 3. September 1997. pp. 6 – 7.

VINTÉM, C. (1998) - *"Cartografia Geológica, Prospecção e Exploração dos Mármores"*. V Congresso Nacional de Geologia. Livro Guia das Excursões. Instituto Geológico e Mineiro. Novembro. Lisboa. pp. 201 - 206.

WEST, G. (1991) - *"The Field Description of Engineering Soils and Rocks"*. Geological Society of London Professional Handbook. Open University Press. Milton Keynes. Philadelphia.

ANEXOS

(Páginas A.1 a A.19)

ANEXO I

EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE LOUSAS

Informações sobre a exploração subterrânea das lousas de Valongo

<table>
<tr><th>Ilustração</th><th>Geologia</th></tr>
<tr><td rowspan="3">
Alçado

Planta

Fotografia

</td><td>As lousas são exploradas nos xistos siltíticos pertencentes ao Complexo Xisto-Grauváquico do Ordovícico do Anticlinal de Valongo. Tratam-se de xistos ardosíferos homogéneos de cor cinzenta. Estes xistos assumem uma direcção NW-SE, inclinando para NE. A xistosidade apresenta-se segundo planos subverticais.</td></tr>
<tr><th>Método de Desmonte</th></tr>
<tr><td>O método utilizado nas Lousas em Valongo, conhecido por “garrafão”, foi iniciado no século XIX, e consiste na abertura de uma cavidade de entrada em subterrâneo em poço, com cerca de 5 m × 6 m de área, na qual se iniciam os trabalhos até uma profundidade de cerca de 25 m. A partir dessa profundidade a exploração começa a alargar, podendo chegar aos 100 m de comprimento por 15 m de largura e atingir profundidades de cerca de 130 m. Entre explorações adjacentes deixa-se um maciço de protecção de cerca de 5 m, caso pertençam à mesma empresa, se forem de empresas diferentes ter-se à que deixar 10 m de protecção, à luz da legislação vigente. O desmonte é realizado com recurso a roçadoras de bancada que fazem os cortes verticais que definem os blocos a desmontar, sendo o corte de levante realizado através de da máquina de fio diamantado, ou, mais raramente, por guilhação.</td></tr>
</table>

ANEXO II

CONTEÚDO DO ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE

(adaptado de Bradley, 1999)

I. Recolha de dados
- a Levantamento topográfico
- b Levantamento geológico
  - Estudo das litologias
  - Estudo de fracturação
  - Estudo geomorfológico
  - Definição prévia do modelo geoestrutural
- c Levantamento hidrogeológico
- d Estudo das condições logísticas (serviços, infra-estruturas, acessos, etc.)

II. Características geológico – económicas
- a Características comerciais dos materiais (recolher amostras e realizar ensaios tecnológicos)
- b Quantificação do volume disponível para exploração (com base no levantamento geológico)
- c Análise da blocometria disponível para exploração (com base no estudo da fracturação)
- d Quantidade de material sem valor comercial (escombros) a desmontar

III. Parâmetros de desmonte
- a Técnicas de extracção (considerações sobre o método de desmonte a utilizar)
- b Equipamentos necessários (análise dos equipamentos possíveis de aplicar)

IV. Análise económica
- a Investimento
  - Equipamentos, ferramentas e materiais
  - Infra-estruturas
  - Trabalhos de preparação (acessos, decapagem, etc.)
- b Custos de produção
  - Amortização dos equipamentos
  - Custos com pessoal
  - Consumíveis
- c Receitas estimadas
  - Preço de mercado (pode ser obtido por comparação com materiais semelhantes ou consultando um especialista)
  - Produção estimada (comparação com projectos semelhantes)
- d Relação custo/receitas (para estudar esta relação deve ser efectuado o estudo anual para o período de amortização do investimento, não deixando de considerar a taxa de inflação e outros dados que possam ser importantes)

V. Conclusões e recomendações

Devem ser apresentados os seguintes pontos:
- a Interesse do projecto
- b Valor do investimento necessário
- c Expectativas económicas
- d Quantificar o risco
- e Identificar a informação em falta (necessidade de estudos de pormenor baseados em sondagens ou outros).

ANEXO III

ASPECTOS A CONSIDERAR NA ELABORAÇÃO DO PLANO DE LAVRA

(baseado no folheto intitulado "Plano de Lavra" publicado pelo IGM em 1997)

I. Introdução

Identificação da empresa, dos objectivos a atingir e descrição geral do projecto que se pretende levar a cabo.

II. Caracterização da Massa Mineral

1 Localização e logística – deve ser apresentada uma fotografia e um mapa de localização (à escala 1/25.000 e 1/5.000). Com base nestes mapas devem ser descritos os seguintes aspectos:

   a Estradas de acesso à pedreira;

   b A vila ou cidade mais próxima que pode oferecer serviços básicos;

   c Linhas eléctricas, linhas de água, etc..;

   d Caminhos de ferro (caso existam).

2 Levantamento topográfico - Descrição da topografia e apresentação do levantamento à escala 1:1000 ou 1:500, dependendo da morfologia da área onde está implementada a pedreira. Descrição do mapa apresentado.

3 Levantamento geológico – Apresentação de um mapa geológico de localização à escala 1:50000 para enquadramento regional e de outro à escala 1:10000 da pedreira, com a delimitação das unidades litológicas e representando os fenómenos geológicos mais importantes (falhas, filões, estruturas, fracturas, etc.). Com base na informação colhida e no mapa geológico devem ser realizados os seguintes estudos:

   a Análise das litologias em termos da sua aptidão ornamental e das suas variações, incluindo possíveis defeitos comercialmente penalizantes;

   b Estudo da fracturação, identificação das principais famílias e sua distribuição espacial no jazigo

   c Apresentação dos *logs* de sondagem e dos resultados atingidos com outros métodos de prospecção (ex.: geofísicos);

   d Representação do modelo geoestrutural do jazigo mineral a 3D, ou a 2D através de cortes geológicos;

   Finalmente, deve produzir-se um mapa geológico detalhado à escala 1:1000 ou 1:500, essencialmente, para mostrar as características geológicas sob o ponto de vista da exploração. Por outro lado, a fracturação da área deverá ser apresentada num mapa de fracturação que será útil para estudar a blocometria do material a explorar e a estabilidade dos desmontes. Com estes mapas deve ser estabelecido um zonamento ornamental do jazigo.

4 Levantamento geotécnico – devem ser apresentadas as propriedades geomecânicas das várias litologias presentes no jazigo, através de resultados de ensaios laboratoriais, e as características da fracturação que compartimenta o maciço, sob o ponto de vista geotécnico. As tensões preexistentes no maciço rochoso, na zona de abertura da galeria em subterrâneo, devem ser conhecidas, devendo os seus valores ser apresentados. Toda esta informação deve ser interpretada, devendo ser definido o modelo geomecânico do maciço através de um zonamento geotécnico. Esse zonamento pode ser apresentado através de cortes ou de blocos-diagrama.

5 Cálculo de Reservas – devem ser apresentadas as reservas existentes no jazigo atendendo aos três tipos de níveis de reservas definidos internacionalmente, ou seja, reservas certas, prováveis e possíveis, em função dos estudos geológicos efectuados.

6 Zonamento Ornamental-Geotécnico – com base na caracterização geológica e geotécnica efectuada, deve ser elaborado um zonamento ornamental-geotécnico que permita a identificação das zonas com explorabilidade em subterrâneo, quer em termos de qualidade e blocometria do mármore, quer ao nível da qualidade geomecânica do maciço rochoso.

III. Dimensionamento dos desmontes

Com base nos dados geológicos e geomecânicos devem ser dimensionados os desmontes, definido o local de abertura da exploração subterrânea e planeados os avanços. Para tal, deve recorrer-se a métodos analíticos (Método da Área Tributária ou outros) e numéricos (Método dos Elementos Finitos, Método dos Elementos Fronteira, etc.), apresentando argumentos que validem as soluções encontradas.

IV. Plano de trabalhos

1 Meios a utilizar – neste plano devem ser apresentadas as seguintes informações:

a Método de desmonte:

- Operações unitárias;
- Operações auxiliares (ventilação, iluminação, esgotos, etc.);
- Equipamentos utilizados;

b Recursos humanos necessários e sua função;

c Definição dos trabalhos de monitorização a efectuar e dos instrumentos a aplicar, referindo a periodicidade das medições para cada um;

d Identificação das principais causas de instabilidade que se podem verificar durante os desmontes em subterrâneo, definindo os sistemas de suporte artificial passíveis de aplicar em cada uma delas.

2 Faseamento da lavra – projectar os avanços da exploração numa base espaço–temporal, estimando produtividades, taxas de recuperação e rendimentos comerciais. As várias fases de escavação devem ser descritas e ilustradas em mapas à escala 1:1000 ou 1:500.

3 Infra-estruturas e serviços – devem ser projectadas todas as infra-estruturas de apoio necessárias ao bom funcionamento da exploração, nomeadamente:

a Instalações sociais e de higiene (refeitórios, sanitários, vestiários e duches);

b Instalações de apoio (oficina, casa de compressores, depósito de combustível, arrecadações, etc.);

c Zona de deposição de escombros;

d Parque de blocos;

e Caminhos no interior da exploração.

Toda esta informação deve ser apresentada num mapa de *Layout* da pedreira à escala 1:1000 ou 1:500.

V. Plano de Segurança e Saúde

1 Enquadramento legal do plano de segurança e saúde;

2 Análise de riscos presentes nas operações, zonas, instalações e vias de circulação, avançando medidas preventivas para cada situação encontrada;

3 Definição das medidas e equipamentos de protecção colectiva a implementar com vista a minimizar os riscos existentes;

4 Definição dos equipamentos de protecção individual a fornecer aos trabalhadores em função das suas actividades, distinguindo os obrigatórios e permanentes, dos temporários;

5 Elaboração dum plano de sinalização e de circulação para a exploração;

6 Identificação dos meios de combate a incêndio existentes e sua localização;

7 Identificação dos meios de formação e informação dos trabalhadores em matéria de segurança e higiene no trabalho;

8 Definição do modo de funcionamento dos serviços de segurança, higiene e saúde no trabalho;

9 Plano de exames médicos adoptado pela empresa (medicina do trabalho);

10 Identificação da zona dos primeiros socorros e dos meios existentes, quer materiais, quer humanos.

VI. Ambiente

1 Caracterização da situação de referência e avaliação dos principais impactes a causar com a abertura da exploração, ao nível da paisagem, flora, fauna, qualidade da água, qualidade do ar, entre outros.

2 Interpretação ambiental – descrição de medidas a adoptar ao nível da recuperação ambiental da área à medida que se avança com a exploração, apresentando mapas ilustrativos no caso da vegetação ou outras acções (operações de aterro, etc.) que se achem necessárias.

ANEXO IV

FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PILARES DE ROCHA

(baseado em Bieniawski, 1987, Brady e Brown, 1985, e em Silva, 1995)

AUTOR	EQUAÇÃO	VALIDADE	TIPO DE INVESTIGAÇÃO	TIPO DE ROCHA
Holland & Gaddy (1964)	$\sigma_r = \frac{k\sqrt{W_p}}{H_p}$ em que $k = \sigma_c \sqrt{D}$, com D o diâmetro ou o lado do provete cúbico ensaiado em laboratório	A equação é válida para pilares com W_p/H_p entre 2 e 8	Ensaios de laboratório	Vários tipos de rocha
Obert & Duvall (1967)	$\sigma_r = \sigma_c\left(0.778 + 0.222\frac{W_p}{H_p}\right)$ em que σ_c é a resistência á compressão uniaxial de um cubo de rocha em que $(W_s/H_s = 1)$	A equação é válida para valores de W_p/H_p entre 0.25 e 4	Ensaios de laboratório	Rochas duras
Holland (1973)	$\sigma_r = \sigma_c\sqrt{\frac{W_{p'}}{H_p}}$ em que σ_c é a resistência à compressão uniaxial de um cubo de rocha em que $(W_s/H_s = 1)$	----	Ensaios de laboratório	Carvão
Salamon & Munro (1967)	$\sigma_r = 0.79\ \sigma_c \frac{W_p^{0.46}}{H_p^{0.66}}$ em que σ_c é a resistência à compressão uniaxial do material que constitui o pilar	-----	Ensaios *in situ*	Carvão
Bieniawski (1967)	$\sigma_r = \sigma_c\left(0.64 + 0.36\frac{W_p}{H_p}\right)$ em que σ_c é a resistência à compressão uniaxial do material que constitui o pilar determinada num cubo de rocha em que $(W_s/H_s = 1)$	Aplicável a pilares com W_p/H_p entre 0.5 e 3.4	Ensaios *in situ*	Carvão
Hardy & Agapito (1977)	$\sigma_r = \sigma_c \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^{-0.118} \times \left(\frac{\frac{W_p}{H_p}}{\frac{W_s}{H_s}}\right)^{0.833}$ em que σ_c é a resistência à compressão uniaxial do provete de material que constitui o pilar, e com (para pilares quadrados): $V_p = W_P^2 H_p$ (Volume do Pilar) $V_s = W_s^2 H_s$ (Volume do Provete)	------	Ensaios *in situ*	Xistos Betuminosos

Parâmetros: W_p – Largura do pilar H_p – Altura do pilar W_s – Largura do provete H_s – Altura do provete σ_r – Resistência do pilar

ANEXO V

METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DOS DESMONTES POR CÂMARAS E PILARES

Uma metodologia que pode ser adoptada para dimensionar os desmontes subterrâneos de mármore, consta das seguintes etapas (baseado em Bieniawski, 1987):

1. Estudar a informação ornamental-geotécnica disponível atendendo à caracterização realizada do jazigo marmóreo (zonas exploráveis, sua distribuição no jazigo e propriedades geomecânicas das mesmas).

2. Definir a forma dos desmontes atendendo às áreas e volumes existentes com condições de serem explorados em subterrâneo, com base na classificação das zonas ornamental-geotécnicas.

3. Com base nas características geotécnicas médias das zonas exploráveis, determinar o vão máximo admissível sem suporte em cada uma (caso exista mais do que uma) pelas classificação geomecânicas de Bieniawski e de Barton e comparar os valores obtidos com as duas classificações.

4. Aplicar o método da área tributária a cada zona de características geotécnicas diferentes, estudando-as através de gráficos que relacionem a Área Tributária, a Taxa de Recuperação, o Factor de Segurança e a Resistência do Pilar, de modo a estudar a melhor dimensão a dar aos pilares e às câmaras em função do equilíbrio entre a segurança e a recuperação.

   Notas:

   - Para realizar este estudo a resistência dos pilares deve ser estimada por várias fórmulas das apresentadas no Anexo IV, com especial destaque para a fórmula de Holland-Gaddy que é a mais conservativa.

   - Deve ser assumido um valor adequado para o factor de segurança (F_S) atendendo ao caso em estudo (lavra subterrânea de mármores). Assim, F_S deve assumir um valor que não permita a indução de fracturação no maciço rochoso em virtude do estado de tensão gerado pela abertura da cavidade (valores típicos: 3 a 5 - utilizados em várias explorações no mundo). Dada a complexidade geológica e geotécnica do Anticlinal deve utilizar-se um factor de segurança mais elevado. O valor a utilizar deve ser estabelecido em função das características geotécnicas da zona onde se pretende abrir a exploração e da sua potencial evolução em profundidade, a qual irá baixar a segurança da exploração (esbeltez dos pilares).

5. Registar a percentagem de recuperação conseguida com a solução adoptada e verificar se a mesma permitirá uma viabilidade económica da exploração. Os valores obtidos devem ser superiores a 70%.

6. Verificar pela teoria das vigas encastradas se a flexão no vão das câmaras, atendendo à espessura dos estratos sobrejacentes, não provoca a rotura das mesmas.

7. Comparar os valores obtidos com o método da área tributária com os resultados das classificações geomecânicas.

8. Testar os parâmetros geométricos dos desmontes encontrados pelo método da área tributária através da aplicação de métodos de análise numérica (ex.: Método dos Elementos Finitos ou outros) e averiguar a validade dos mesmos em termos de deformabilidade e resistência.

9. Ajustar os parâmetros geométricos dos desmontes com base nos resultados das simulações através dos métodos de análise numérica, atendendo ao facto de que não devem existir pontos de rotura no maciço em redor da cavidade a explorar.

ANEXO VI

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA DE MÁRMORES

I. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO CORTE

Roçadora – é utilizada para cortar a rocha. Existem dois tipos de roçadoras: roçadoras de bancada e roçadoras de galeria. O método de corte em ambos os casos é semelhante, ou seja, a lança é composta por uma cadeia ou por uma cinta diamantada, animada de movimento de rotação que penetra na rocha promovendo o corte.

Depois de penetrar na rocha o corte prossegue através de um movimento de translação. Em ambos as versões da roçadora é possível realizar cortes verticais e horizontais.

A roçadora de galeria é utilizada na fase de abertura das galerias, sendo o equipamento principal da exploração subterrânea. A roçadora de bancada é utilizada, geralmente, para fazer cortes de levante na fase de rebaixo, embora possa também fazer cortes verticais , desde que a bancada não seja muito alta (≤ 3m).

Roçadora de cadeia:

- Corrente de corte com dentes cúbicos em *WIDIA*, que podem ser substituídos por placas cilíndricas de *WIDIA* ("*strata Pack*"), cuja superfície possui uma cobertura de diamante sintético policristalino que garante uma maior eficiência de penetração e superfícies de corte mais regulares, embora com maiores custos (Fornaro e Bosticco, 1994b).
- Dados:
  Consumo de lubrificantes: 2kg /h
  Água: 4-5 l/min
  Velocidade de corte :
    Mármore do Anticlinal ≈ 3m^2/h
    Outros mármores ≈ 4.5-8 m^2/h (Fornaro e Bosticco, 1994b).
  Profundidade do corte: 1.5 a 2 m
  Altura do corte: 3 a 4.5 m

Roçadora diamantada:

- Cinta diamantada que promove o corte da rocha, a qual desliza sobre a lança devido a um fenómeno de *aqua planning*.
- Dados:
  Água: 120 l/min
  Velocidade de corte :
    Mármore do Anticlinal ≈ 1 a 1.5 m^2/h
    Outros mármores ≈ 2.5 a 3.5 m^2/h
  Profundidade do corte: 2.1 m

I. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO CORTE

Máquina de fio diamantado – utilizada para cortar a rocha. A ferramenta cortante é o fio diamantado, o qual não faz parte integrante da máquina. Este fio é passado por dentro dos furos previamente executados na bancada a desmontar. O corte é possível dado o tensionamento e o movimento de rotação do fio que a máquina lhe confere. Esta máquina permite a realização de cortes horizontais, verticais e oblíquos a qualquer inclinação.

No desmonte em subterrâneo pode intervir na fase de entrada em galeria para realização dos cortes posteriores dos blocos ou na fase de rebaixo para realizar todos os cortes, com excepção do de levante que pode ser realizado com a roçadora de bancada.

A velocidade de corte depende dos seguintes factores:

- Estado das pérolas diamantadas;
- Dureza da rocha;
- Potência da máquina de fio;
- Comprimento do fio a utilizar.

Velocidades de corte típicas (máquinas com 59 kW):

Mármore Italiano = 7 a 9 m^2 /h (Pingarim, 1989, *in* Fornaro e Bosticco, 1994b)
Mármore do Anticlinal (mais duro)= 4 a 7 m^2/h

Normalmente, as pérolas que compõem o fio são separadas através de anilhas (espaçadores) e de molas que permitem a rotação das pérolas de modo a provocar um desgaste uniforme de toda a superfície diamantada. Para rocha abrasiva o fio diamantado pode ser revestido de plástico entre as pérolas que protege o cabo de aço da mistura abrasiva que se forma durante o corte.

II. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PERFURAÇÃO

Perfuradora hidráulica à rotação – utilizada para realizar furos para passagem do fio diamantado. Esta máquina utiliza uma cabeça de perfuração do *WIDIA* de diâmetro variado.

Qualquer dos equipamentos apresentados neste quadro só é, geralmente, utilizado na fase de rebaixo, à excepção do martelo pneumático que pode ser utilizado para realizar furos de apoio para os equipamentos ou para remover talhadas.

Perfuradora com martelo de fundo de furo – utilizado de preferência para furos particularmente compridos e/ou em material mais duro do que o normal. Trata-se de uma perfuradora equipada com martelo de fundo furo à roto - percussão e funcionamento pneumático (Jumbo).

Martelo pneumático à roto-percussão de pequeno diâmetro – utilizado para realizar furos onde se vai posteriormente passar o fio diamantado. Este equipamento utiliza uma haste com cabeça cortante de *WIDIA*. Pode ser utilizado manualmente ou montado sobre uma estrutura própria.

III. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO DERRUBE

Colchões (pneumáticos ou hidráulicos) – podem ser metálicos de forma quadrada com um metro de lado e espessura milimétrica, os quais são cheios de água através de uma bomba eléctrica de alta pressão (colchões hidráulicos). Existem ainda modelos em PVC disponíveis no mercado (neste caso é cheio de ar) com dimensões maiores (colchões pneumáticos).

Estes colchões podem ser utilizados para destacar os blocos da frentes (corte posterior) durante a fase de escavação em galeria e para derrubar ou afastar as talhadas na fase de rebaixamento da escavação subterrânea.

III. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO DERRUBE

Macacos hidráulicos – trata-se de uma caixa com um piston que, quando conjugada hidraulicamente através de uma bomba eléctrica, empurra a rocha promovendo a sua queda.

Os macacos hidráulicos são apenas utilizados na fase de rebaixamento para derrubar as talhadas, raramente tem aplicação durante a fase de escavação em galeria.

No derrube podem ainda ser utilizadas as pás carregadoras e as giratórias para remover os blocos, afastar ou mesmo e derrubar as talhadas, quer seja na fase de escavação em galeria, quer nas operações de rebaixo.

IV. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ESQUADREJAMENTO

Esta operação, que consiste em dividir a talhada desmontada em blocos de dimensões transportáveis, quando não é feita naturalmente através das fracturas presentes, tem que se recorrer a equipamentos. Os equipamentos utilizados nesta fase são geralmente: a máquina de fio diamantado ou o martelo pneumático e guilhos (guilhação).

V. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Pá carregadora – utilizada para:

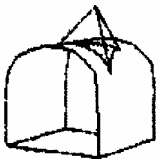
- Carregar e movimentar blocos;
- Carregar, empilhar e remover escombros;
- Auxiliar no derrube de talhadas;
- Movimentar máquinas e equipamento;
- Construção de rampas de acesso para os vários pisos da pedreira;

Este equipamento apresenta, em geral, capacidades de carga superiores a 15 ton e uma potência média da ordem dos 250 – 300 CV.

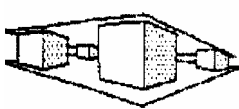
Escavadora giratória – utilizada nas seguintes operações:

- Derrube de talhadas;
- Remoção de porções de rocha da frente;
- Construção de caminhos;
- Remoção de escombros;
- Fragmentação de escombros quando equipada com martelo hidráulico.

As versões mais comuns de escavadoras giratórias nas pedreiras apresentam potências da ordem dos 300 CV.

Dumper ou camião de pedreira – utilizados essencialmente para transportar escombros desde a frente até à escombreira. São carregados pelas pás carregadoras ou pelas escavadoras giratórias. Apresentam, geralmente, uma capacidade média de carga da ordem das 20 ton, embora possa variar.

V. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Grua ("Derrice") – utilizada para extrair da pedreira, no caso desta ter alguma profundidade (geralmente mais de 30 m), os blocos de rocha comercializáveis e, por vezes, alguns escombros. Serve ainda para movimentar equipamentos de um piso para outro. A grua possui uma lança da ordem dos 30 m, podendo extrair cargas da ordem das 20 a 30 ton, dependendo da inclinação da lança. Existem gruas com maiores capacidades. Estes equipamentos podem ser comandados por controlo remoto. São constituídos por estruturas metálicas bem apoiadas em sapatas ou através de espias, com estruturas de ferro ou de cabos de aço, respectivamente. Os elementos de esforço utilizados são cabos de aço que suportam o peso da carga.

ANEXO VII

PRINCIPAIS CAUSAS DE INSTABILIDADE NOS DESMONTES DE MÁRMORE EM SUBTERRÂNEO

(adaptado de Hoek, 1998).

	Túneis pouco profundos em rocha fracturada	Taludes de rocha com descontinuidades	Taludes de rocha com descontinuidades verticais
PROBLEMAS TÍPICOS	Quedas por gravidade ou deslizamento de cunhas ou blocos definidos pela intersecção de fracturas.	Deslizamento planar ou em cunha ao longo de um plano de fractura ou ao longo da linha de intersecção dos planos de duas famílias de descontinuidades.	Desabamento de colunas de rocha separadas por plano de fracturas paralelos ou quase paralelos à face do talude.
PARÂMETROS CRITICOS	- Orientação, inclinação e resistência ao cisalhamento das descontinuidades estruturais do maciço rochoso; - Forma e orientação da escavação; - Capacidade e sequência de instalação do sistema de suporte.	- Altura do talude, ângulo e orientação do mesmo; - Inclinação e orientação estrutural das fracturas; - Presença de água no talude; - Potenciais acções sísmicas; - Sequência da escavação e instalação dos suportes.	- Altura do talude, ângulo e orientação; - Inclinação e orientação estrutural das fracturas; - Presença de água no talude; - Potenciais acções sísmicas.
MÉTODOS DE ANÁLISE	Podem ser utilizadas técnicas de projecção estereográfica (projecção na rede de Wulf) ou métodos analíticos que permitem a visualização das cunhas que se formam no maciço rochoso circundante à escavação. A análise de equilíbrio limite das cunhas criticas é usada para estudar o modo de rotura, o factor de segurança e a necessidade de suporte.	Análises de equilíbrio limite, que determinam modos deslizantes tridimensionais são usadas para estudos paramétricos do factor de segurança. A análise probabilística, baseada na distribuição das orientações estruturais e da resistência ao corte, são úteis para algumas aplicações.	Análises de equilíbrio limite em modelos simplificados de blocos são úteis para estimar aptidão para tombamentos e deslizamentos. Modelos de elementos discretos representando uma geometria simplificada do talude podem ser utilizados para estudar os mecanismos de rotura por tombamento.
CRITÉRIO DE ACEITABILIDADE	O factor de segurança, incluindo os efeitos de reforço, deverá exceder 1.5 para o escorregamento de cunhas (hasteais) e 2.0 para a queda de cunhas e blocos (tecto). A sequência de instalação do suporte é crítica e as cunhas e blocos devem ser identificados e suportados antes de serem totalmente individualizadas pela escavação.	Factor de segurança maior que 1.3 para taludes "temporários" com risco reduzido de acidente. Factor de segurança maior que 1.5 para taludes "permanentes" com um significativo risco de acidente.	Não existe nenhum critério, geralmente aceitável, para o caso da rotura por tombamento, embora o potencial de queda seja óbvio. A monitorização dos taludes é a única forma de determinar o comportamento do talude e estudar a eficácia das medidas preventivas instaladas.

-- continua --

-- continuação --

	Pedras soltas nos taludes de rocha	Pilares	Pilares soleira
PROBLEMAS TÍPICOS	Escorregamento, rolamento ou queda de pedras ou blocos de rocha do talude.	Progressivo destacamento de blocos pode levar ao colapso do pilar.	Rotura dos pilares nos casos em que o seu dimensionamento não é o adequado, ou seja o vão das câmaras e a espessura do pilar criam instabilidade.
PARÂMETROS CRITICOS	- Geometria do talude; - Presença de pedras e blocos soltos; - Forma dos blocos presentes no talude; - Presença de estruturas que levem as pedras e blocos a cair.	- Resistência da massa rochosa que forma o pilar; - Presença de fracturas com orientação desfavorável; - Geometria do pilar, especialmente, a relação entre a largura e a altura do mesmo; - Geometria dos desmontes globais.	- Resistência da massa rochosa que forma o pilar; - Presença de alteração e/ou de fracturas no caso de pilares soleira superficiais; - Estado de tensão *in situ* e geometria do pilar soleira.
MÉTODOS DE ANÁLISE	Cálculo de trajectórias de queda e rolamento das pedras, baseado na mudança de velocidades motivadas por cada impacto. A análise de Monte Carlo para várias trajectórias baseada, na variação da geometria do talude e nas propriedades das superfícies, dá uma informação útil sobre a distribuição dos blocos que caiem.	Para pilares esteios a resistência do pilar pode ser estudada através de fórmulas empíricas baseadas na relação entre a largura e a altura dos pilares e na resistência da rocha que os constitui, utilizando o método da área tributária para determinar a tensão actuante no pilar e assim estimar o factor de segurança. Para geometrias complexas podem ser utilizados métodos de análise numérica.	Classificação do maciço rochoso através das classificações geomecânicas e análise de equilíbrio limite permitem obter importante informações sobre as dimensões adequadas dos pilares soleira. Análises através de métodos numéricos, incluindo o método dos elementos discretos, pode dar os níveis aproximados de tensão e indicar as zonas de potencial rotura.
CRITÉRIO DE ACEITABILIDADE	A localização da queda de blocos e a sua distribuição dá indicação sobre a magnitude deste problema e sobre a eficácia das medidas adoptadas, nomeadamente a aplicação de redes metálicas, a criação de diques, etc..	O factor de segurança de pilares esteios para um único nível de exploração, no caso de serem pilares "permanentes", deve exceder o 1.6. Deve evitar-se a rotura de um único pilar sob pena de danificar a jazida e de poder provocar um efeito de "dominó" nos pilares vizinhos.	Pilares soleira próximos da superfície devem ter uma espessura tal que assegurem a estabilidade das escavações e a ausência de pontos de rotura. Os pilares de soleira no interior do maciço podem necessitar de elementos de suporte de modo a evitar o aparecimento de grandes concentrações de tensões e de golpes de terreno.

ANEXO VIII

CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS SISTEMAS DE SUSTIMENTO

(baseado em Hoek, 1998)

1. Pregagens Cimentadas

- Podem ser utilizadas em substituição das ancoragens;
- Não podem ser tensionadas ao contrário das ancoragens;
- O tensionamento deste sistema é função do movimento da rocha;
- As barras de ferro podem ser substituídas por cabos com melhoria ao nível da flexibilidade e resistência à abrasão;
- A barra ou cabo deve ser colocado depois do furo estar cheio de cimento;
- Relação água/cimento na ordem dos 0.3 a 0.35;
- Dados práticos de acordo com os testes efectuados por Stillborg (1994), *in* Hoek (1998):
    - Barra de aço: 20 mm de diâmetro;
    - Resistência à tracção da barra de aço: 18 ton;
    - Diâmetro do furo: 32 mm;
    - Relação água/cimento de 0.35 origina 11 dias de tempo de cura.

2. Pregagens de Atrito ou "SPLIT SET"

- O tubo apresenta um rasgo longitudinal que permite o ajuste da pregagem ao furo. O furo é realizado com diâmetro inferior ao do tubo de modo a gerar a acção de atrito. O prato que fica na cabeça da ancoragem vai ser responsável pela geração de cargas que contrariam o peso dos blocos, evitando assim que estes caiam. A pressão radial desenvolvida pelo tubo da pregagem vai ser cada vez mais forte à medida que o tempo passa e que se registam movimentos no maciço.
- O tubo é colocado por pressão num furo de diâmetro inferior ao seu diâmetro;
- É gerada uma força radial devido à compressão do tubo promovendo uma pregagem por atrito a todo o comprimento do furo;
- Fácil e rápido de instalar;
- Problemas de corrosão que podem ser minimizados com a utilização de tubos galvanizados e com a cimentação do interior do furo;
- Dados práticos:
    - Diâmetro do tubo: 39 mm (tipo SS-39);
    - Resistência à tracção do tubo: 11ton;
    - Diâmetro do furo: 37 mm.

3. Pregagens do Tipo "SWELLEX"

- Tubo em forma de C;
- Aplicada com uma pressão hidráulica de 30 MPa;
- Problemas de corrosão que têm vindo a ser melhorados com revestimentos anti-corrosão;
- Instalação rápida;
- Funciona por atrito na parede do furo;
- Dados práticos:
    - Diâmetro do tubo: 26 mm (tipo EXL);
    - Resistência à tracção do tubo: 11,5 ton (Stillborg, 1994 *in* Hoek, 1998);
    - Diâmetro do furo: 37 mm;
    - Pressão da barra para a expansão do tubo: 30 MPa.

4. Ancoragens Mecânicas

- Furo com comprimento de pelo menos 100 mm mais que o comprimento da ancoragem de modo a dar aperta à cunha;
- Fixação feita através de uma cunha;
- A tensão a aplicar não deverá ser superior a 70% da capacidade de carga da ancoragem;
- Não aconselhados em maciços muito fracturados (a cunha faz deformar a rocha não fixando a ancoragem);
- O espaço entre a ancoragem e as paredes do furo pode ser cheio de cimento por causa da corrosão, para grandes períodos de utilização;
- Relação água/cimento típica da ordem dos 0.4 a 0.5;
- Dados práticos (Stillborg, 1994, *in* Hoek, 1998):
    - Diâmetro da barra de aço: 17.28 mm;
    - Resistência à tracção de 12.7 ton.

5. Ancoragens com Resina

- Utilizado para maciços, ou zonas de maciços, fracos;
- Resina em cartuchos preenche o furo totalmente;
- Barra de aço de reforço colocada no interior dos cartuchos por furação;
- Com a pressão a resina sai dos cartuchos e mistura-se com um catalisador que promove o seu endurecimento em poucos minutos (varia com o tipo de resina);
- Funciona para vários tipos de rocha;
- Ancoragem forte;
- Pode ser tensionada após poucos minutos (média de cerca de 3 minutos);

- Tempo de vida curto por causa da resina, que se deteriora com as condições de temperatura (pode não durar mais de 6 meses);
- O comportamento da interface resina/barra deve ser testada previamente antes de se aplicar as ancoragens;
- Dados práticos (Stillborg, 1984, *in* Hoek, 1998):
    - Barra de aço: 20 mm;
    - Resistência à tracção da barra: 18 ton;
    - Diâmetro do furo: 32 mm;
    - Resina: cartuchos de resina de poliester com 60 minutos de tempo de cura.

6. Ancoragens Mecânicas

- Relação água/cimento entre 0.35 a 0.4 para a instalação;
- O cabo resiste ao deslizamento devido á pressão de confinamento do cimento e do coeficiente de atrito entre o cabo de aço e o cimento;
- São utilizadas para comprimentos grandes, da ordem das dezenas de metros.

7. Redes Metálicas

A malha electrossoldada típica para usar com o betão projectado possui arames com cerca de 4 mm de espessura (diâmetro) interligadas formando uma malha de 100 × 100 mm^2. Com esta configuração a malha metálica tem a vantagem de possuir as características ideais do ponto de vista mecânico e, além disso, pode ser colocada e manuseada por um só homem.

8. Betão Projectado

O betão projectado é constituído por cimento, areia e britas de granulometria fina, as quais são aplicadas através de energia pneumática e compactadas de um modo dinâmico, graças à alta velocidade com que são projectados. Em termos de aplicação, a zona a projectar deve ser previamente sujeita a um jacto de ar ou água de modo a remover eventuais pedras soltas e poeiras existentes na superfície. O betão é projectado a cerca de 1 a 1.5 m de superfície em pequenos círculos. Para realizar este trabalho a galeria deve estar bem iluminada e ventilada.

ANEXO IX

METODOLOGIA DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DO SUSTIMENTO A APLICAR

No dimensionamento do suporte a utilizar para o caso em estudo, devem ser seguidos os passos que se apresentam abaixo para realizar uma primeira avaliação da situação (baseado em Hoek e Brown, 1980):

1. Durante a fase de prospecção, e com base nos dados colhidos, devem ser feitas tentativas de classificar o maciço rochosos com base das duas classificações geomecânicas (Bieniawski e Barton).

2. Estudar, preliminarmente, os tipos de suporte a aplicar, com base nos dados empíricos disponíveis por parte das mesmas classificações.

3. Estimar os valores das tensões *in situ* com base em medições regulares em locais adjacentes ao local de abertura da escavação e em material semelhante. Se não existirem possibilidades de realizar medições, as mesmas podem ser estudadas com base nas formulas: $\sigma_v = \gamma h$ e $\sigma_h = K\sigma_v$.

4. Estimar a tensão máxima em redor da superfície da escavação, atendendo à distribuição de tensões em função da forma da cavidade e por aplicação de métodos de análise numérica (método dos elementos fronteira, método dos elementos finitos, método dos elementos discretos, etc.).

5. Com a utilização dos dados geológicos disponíveis, devem ser examinados as situações possíveis de gerar cunhas ou blocos individualizados capazes de cair. Para tal podem ser utilizadas técnicas de projecção estereográfica através da rede de Wulf. Se existirem possibilidades de queda ou escorregamento de blocos, devem ser considerados comprimentos e capacidades de carga das ancoragens e pregagens suficientes para estabilizar a escavação.

   Suporte de cunhas ou blocos individualizados (Hoek e Brown, 1980)

   O factor de segurança de um bloco ou cunha reforçado, relativamente ao escorregamento, através de ancoragens, é dado por (cunhas nos hasteais):

$$F_s = \frac{c_d A + (P\cos\psi + T\cos\theta)\,\mathrm{tg}\phi_d}{P\mathrm{sen}\psi - T\mathrm{sen}\theta}$$

em que: c_d – Coesão
ϕ_d - Ângulo de atrito
A – Área dos planos de escorregamento
P – Peso da cunha
T – Tensionamento das ancoragens
ψ e θ estão representados na figura seguinte

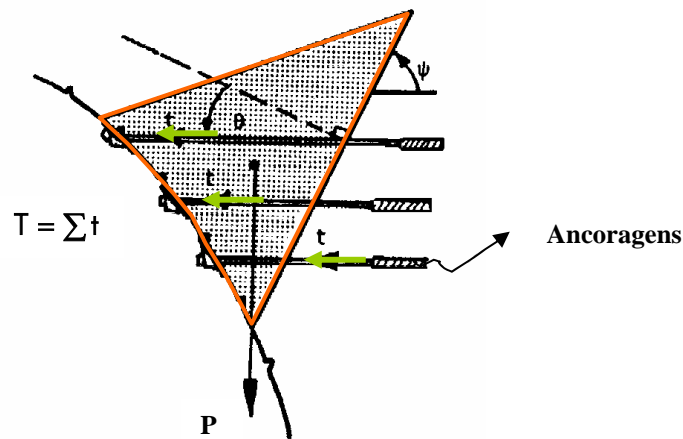



Figura A1 – Aplicação de ancoragens para evitar a queda de blocos individualizados.
(fonte: Hoek e Brown, 1980)

Então a força requerida às ancoragens é de:

$$T = \frac{P\left(F_s \operatorname{sen}\psi - \cos\psi \ \operatorname{tg}\phi_d\right) - c_d A}{\cos\theta \ \operatorname{tg}\phi_d + F \operatorname{sen}\theta}$$

em que F_s deve estar situado entre 1.5 e 2.

Nota: no caso de cunhas de tecto não se contabiliza a resistência por atrito dado que esse atrito não é mobilizado nas quedas.

Na utilização de ancoragens, e de acordo com a experiência (Long, 1961, in Hoek e Brown, 1980), é útil seguir as seguintes regras:

Comprimento mínimo da ancoragem

- O dobro do espaçamento;
- Três vezes a largura dos blocos críticos e instáveis definidos pelo espaçamento entre fracturas;
- Para vãos até 6 m o comprimento da ancoragem deverá ser igual a metade do vão;
- Para vãos entre 18 e 30 m o comprimento da ancoragem deverá ser igual a um quarto do vão;
- Para escavações com alturas superiores a 18 m o comprimento da ancoragem nas paredes (hasteais) deverá ser igual a um quinto da altura da parede.

Espaçamento máximo de ancoragens

Pelo menos de:

- Metade do comprimento da ancoragem;
- 1,5 vezes a largura dos blocos críticos e instáveis definidos pelo espaçamento das fracturas no maciço rochoso;
- Com malhas metálicas, o espaçamento da ancoragem maior que 2 m torna difícil a fixação das redes (mas não impossível).

A tensão exercida pelas ancoragens aplicadas ao maciço assume o valor dado pela seguinte fórmula (Coates, 1981):

$$\sigma_p = \frac{n F}{A} \qquad \text{com} \qquad F \leq a\,\sigma_c$$

em que:
n – Número de tirantes
F – Força aplicada ao tirante
a – Secção transversal dos tirantes
A – Área reforçada
σ_c – Resistência à compressão da rocha intacta
σ_p – Tensão exercida pelas ancoragens

O incremento de resistência mobilizado pela aplicação das ancoragens, perpendicularmente às superfícies de fraqueza, é traduzido numa subida da envolvente de Mohr-Coulomb, tal como se mostra na figura seguinte.

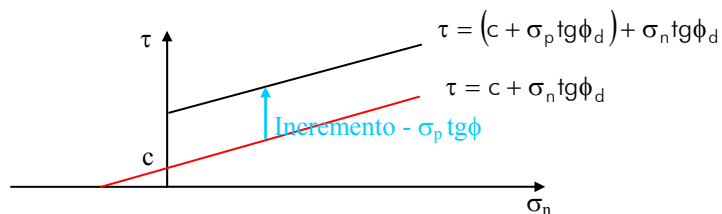



Figura A2 – Incremento de resistência gerado pela aplicação de ancoragens.

6. Prever, de acordo com a sequência de operações e com a variação de tempo de colocação de suporte, as principais implicações na estabilidade da escavação. Se for necessário usar suportes, verificar que estes não interferem de modo negativo com algum aspecto dos trabalhos e escolher o melhor suporte, atendendo ao tipo de instabilidade.